

ISSN 2500-2627

Номер 2

Март - Апрель 2023



# РОССИЙСКАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ НАУКА

[www.sciencejournals.ru](http://www.sciencejournals.ru)

*Научно-теоретический журнал*



**Земледелие и мелиорация**

- Н.Н. Дубенок, А.В. Гемонов, К.Ю. Ильченко**  
Научно-обоснованный режим орошения малины при капельном поливе в условиях Центрального Нечерноземья 3
- А.Н. Салугин**  
Имитационное моделирование деградации пастбищных экосистем аридной зоны 7
- А.Ю. Тимохин, В.С. Бойко, А.Б. Володин, Т.Н. Нижельский, В.В. Михайлов**  
Продуктивность сорго сахарного в смеси с бобами кормовыми при моделировании различных условий минерального питания 11
- Х.А. Хусайнов, М.Ш. Гаплаев, А.В. Тунтаев, Ф.Д. Елмурзаева**  
Урожайность кукурузы и содержание подвижного фосфора в черноземе типичном при разных приемах основной обработки с использованием средств химизации и биологизации 16

**Растениеводство, защита и биотехнология растений**

- Н.Н. Лой, Н.И. Санжарова, Е.А. Казакова, С.В. Битаршвили**  
Действие предпосевного электронного излучения на развитие проростков ячменя и активность ферментов и фитогормонов 21
- А.Л. Бакунов, Н.Н. Дмитриева, С.Л. Рубцов, А.В. Милехин**  
Факторы, определяющие формирование урожайности картофеля в условиях недостаточного увлажнения 25
- М.В. Илюшко, М.В. Ромашова, С.С. Гученко**  
Устойчивость удвоенных гаплоидов риса *Oryza sativa* L. дальневосточной селекции к полеганию 30
- Дамир Ф. Асхадуллин, Данил Ф. Асхадуллин, Н. З. Василова, Е. В. Зуев, А. Р. Хайруллина**  
Содержание аминокислот в зерне образцов яровой мягкой пшеницы 35
- О.И. Болотова, И.А. Сазонова, В.В. Бычкова**  
Фракционный состав белковых полимеров зерна кукурузы как фактор отбора сортообразцов для повышения питательности кормов 40
- Б. М. Гусейнова, Р. Т. Мусаева**  
Минеральный состав и сахарокислотный комплекс интродуцированных и местных селекционных сортов черешни, выращиваемых в Дагестане 45
- Н.М. Коваленко, Ю.В. Зеленева, В.П. Судникова**  
Характеристика популяций *Pyrenophora tritici-repentis*, *Parastagonospora nodorum* и *Parastagonospora pseudonodorum* на территории Тамбовской области по наличию генов-эффекторов 52

**Агрочвоведение и агроэкология**

- И.Ю. Савин**  
О влиянии современных изменений климата на рост урожайности зерновых культур в России 58
- Н.П. Масютенко, А.В. Кузнецов, М.Н. Масютенко, Т.И. Панкова, Г.М. Брескина**  
Эффективность связывания органического углерода в черноземе типичном слабоэродированном при применении биопрепаратов 63
- В.П. Шабаев, В.Е. Остроумов, И.О. Плеханова, В.О. Куликов, М.П. Волокитин**  
Фракционный состав соединений никеля в почве и его накопление в растениях при применении ростстимулирующих ризосферных бактерий на загрязненной тяжелым металлом почве 68

***Farming and Amelioration***

- N.N. Dubenok, A.V. Gemonov, A.V. Lebedev, K.Yu. Ilchenko**  
Scientific-based regime of irrigation of raspberry with dripping irrigation under the conditions of the Central Non-black earth region 3
- A.N. Salugin**  
Simulation of degradation of pasture ecosystems of arid zone 7
- A.Yu. Timokhin, V.S. Boiko, A.B. Volodin, T.N. Nizhelsky, V.V. Mikhailov**  
Productivity of sugar sorgho in a mix with forage beans in modeling various conditions of mineral nutrition 11
- Kh.A. Khusainov, M.Sh. Gaplaev, A.V. Tuntaev, F.D. Elmurzaeva**  
Corn yield and the content of mobile phosphorus in typical chernozem under different methods of basic tillage with the use of chemicalization and biologization means 16

***Plant Growing, Plant Protection and Biotechnology***

- N.N. Loy, N.I. Sanzharova, E.A. Kazakova, S.V. Bitarishvili**  
The effect of pre-sowing electron radiation on the development of barley seedlings and the activity of enzymes and phytohormones 21
- Bakunov A. L., Dmitrieva N. N., Rubtsov S. L., Milekhin A. V.**  
Factors determining the formation of potato yield under conditions of insufficient moisture 25
- M.V. Ilyushko, M.V. Romashova, S.S. Guchenko**  
Resistance of rice *Oryza sativa* L. doubled haploids to lodging for the far eastern breeding 30
- Damir F. Ashadullin, Danil F. Ashadullin, N. Z. Vasilova, E. V. Zuev, A. R. Hajrullina**  
Amino acid content in spring common wheat grain 35
- O.I. Bolotova, I.A. Sazonova, V.V. Bychkova**  
Fractional composition of protein polymers of corn grain 40
- B. M. Guseinova, R. T. Musaeva**  
Content of mineral substances and sugar acid complex of introduced and local breeding varieties of cherries grown in Dagestan 45
- N.M. Kovalenko, Yu.V. Zeleneva, V.P. Sudnikova**  
Characterization of *Pyrenophora tritici-repentis*, *Parastagonospora nodorum* and *Parastagonospora pseudonodorum* populations based on the presence of effector genes in the Tambov oblast territory 52

***Agricultural Soil Science and Agroecology***

- I.Yu. Savin**  
On the impact of modern climate change on the increase of grain yields in Russia 58
- N.P. Masyutenko, A.V. Kuznetsov, M.N. Masyutenko, T.I. Pankova, G.M. Breskina**  
Efficiency of organic carbon sequestration in typical slightly eroded chernozem when biopreparations are applied 63
- V.P. Shabayev, V.E. Ostroumov, I.O. Plekhanova, V.O. Kulikov, M.P. Volokitin**  
Fractional composition of nickel compounds in soil and its accumulation in plants in application of growth promoting rhizosphere bacteria on heavy metal-contaminated soil 68

## НАУЧНО-ОБОСНОВАННЫЙ РЕЖИМ ОРОШЕНИЯ МАЛИНЫ ПРИ КАПЕЛЬНОМ ПОЛИВЕ В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОГО НЕЧЕРНОЗЕМЬЯ

Н.Н. Дубенок, академик РАН, А.В. Гемонов, кандидат сельскохозяйственных наук,  
А.В. Лебедев, кандидат сельскохозяйственных наук, К.Ю. Ильченко

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева,  
127434, Москва, ул. Тимирязевская, 49  
E-mail: ndubenok@rgau-msha.ru

*Малина относится к важным ягодным культурам, объемы производства которой возрастают с каждым годом. Для производства качественного посадочного материала, высоких и устойчивых урожаев в нестабильных погодных условиях необходимы ресурсосберегающие технологии, к которым относится капельное орошение. Цель исследований – разработка научно-обоснованного режима орошения при капельном поливе малины в условиях Центрального района Нечерноземной зоны России. Стационарный полевой опыт был заложен осенью 2019 г. Схема эксперимента предусматривала изучение следующих вариантов: режим капельного орошения (фактор А) – поддержание влажности корнеобитаемого слоя почвы в диапазонах 60...80, 70...90 и 80...100 % наименьшей влагоемкости; сорт малины (фактор В) – Награда и Солнышко. Капельное орошение позволяет в значительной степени экономить поливную воду. В варианте с поддержанием влажности в корнеобитаемом слое в диапазоне 80...100 % НВ экономия поливной воды, по сравнению с традиционными способами полива, составила в среднем 65 %, 60...80 % НВ – 78 %. При этом локальное орошение создает оптимальный водно-воздушный режим почвы. В вариантах опыта с орошением основная доля в суммарном водопотреблении приходится на атмосферные осадки (от 71 до 81 %), на оросительную норму – от 15 до 22 %. В вариантах с поддержанием влажности почвы выше 70 % НВ диаметр штамба растений больше, чем в контроле, на 20...40 %, высота саженцев – на 40...50 %, урожайность – в 2 раза, что позволяет рекомендовать такие режимы в качестве оптимальных.*

## SCIENTIFIC-BASED REGIME OF IRRIGATION OF RASPBERRY WITH DRIPPING IRRIGATION UNDER THE CONDITIONS OF THE CENTRAL NON-BLACK EARTH REGION

N.N. Dubenok, A.V. Gemonov, A.V. Lebedev, K.Yu. Ilchenko

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,  
127434, Moscow, ul. Timiryazevskaya, 49  
E-mail: ndubenok@rgau-msha.ru

*Raspberries are among the important berry crops, the production volumes of which are increasing every year. To obtain high-quality planting material, high and stable yields in unstable weather conditions, it is necessary to develop resource-saving technologies, which include drip irrigation. The purpose of the research is to develop a science-based irrigation regime for drip irrigation of raspberries in the conditions of the Central region of the Non-Chernozem zone of Russia. A two-factor field experiment was established in the fall of 2019. The first factor is the drip irrigation regime (maintaining the moisture content of the root layer of the soil in the ranges of 60...80, 70...90 and 80...100% of the lowest moisture capacity), the second factor is the variety (Nagrada and Solnyshko). Drip irrigation of raspberries can significantly save irrigation water. In the variant of drip irrigation with maintaining moisture in the root layer in the range of 80...100% of the lowest moisture capacity, the savings in irrigation water compared to traditional irrigation methods averaged 65%, and in the variant of 60-80% of the lowest moisture capacity - 78%. At the same time, with the use of local irrigation, an optimal water-air regime of the soil is created. For the irrigated variants of the experiment, the main share in the total water consumption is precipitation (from 71 to 81%), and the irrigation rate - from 15 to 22%. In the variants with maintaining humidity above 70% of the lowest moisture capacity, the diameter of the stem of seedlings is 20-40% larger than in the control, the height of seedlings is 40-50%, and the yield is 2 times, which makes it possible to recommend them as optimal.*

**Ключевые слова:** капельное орошение, малина (*Rubus idaeus*), водопотребление, биометрические показатели, режим орошения.

**Key words:** drip irrigation, raspberries (*Rubus idaeus*), water consumption, biometric indicators, irrigation regime.

Малина относится к важным ягодным культурам, промышленное выращивание которой возрастает как в России, так и во всем мире [1, 2]. В европейской части России ее в основном выращивают в Поволжье, Центральном и Волго-Вятском экономических районах. Малина характеризуется неглубокой корневой системой, поэтому ее растениям необходима влага на всех этапах от завязывания плодов до сбора урожая. Кроме того, эта культура отличается значительной транспирацией листовым аппаратом. Все это делает растения малины чувствительными к дефициту почвенной влаги [3, 4]. Нормальное развитие растений и обильное плодоношение обеспечивает создание оптимального водно-воздушного режима почвы путем орошения. Для формирования качественного посадочного материала, высоких и устойчивых урожаев в нестабильных погодных

условиях необходима разработка ресурсосберегающих технологий, которые сегодня в Центральном Нечерноземье европейской части России отсутствуют.

К числу эффективных и водосберегающих способов полива плодовых и ягодных культур относится капельное орошение [5, 6]. Его применение обеспечивает экономии поливной воды, по сравнению с дождеванием и поливом по бороздам. Кроме того, он обеспечивает создание оптимальных условий для выращивания сельскохозяйственных культур, что, в свою очередь, приводит к повышению урожайности и качества производимой продукции [7, 8].

Цель исследований – разработка научно-обоснованного режима капельного орошения малины в условиях Центрального района Нечерноземной зоны России.

**Табл. 1. Сравнительная характеристика режимов орошения малины в годы исследований**

Показатель	Диапазон влажности в корнеобитаемом слое почвы по годам, % НВ											
	60...80				70...90				80...100			
	2020 г.	2021 г.	2022 г.	среднее	2020 г.	2021 г.	2022 г.	среднее	2020 г.	2021 г.	2022 г.	среднее
Оросительная норма, м <sup>3</sup> /га	598	497	510	535	697	643	624	655	816	819	870	835
Средняя поливная норма, м <sup>3</sup> /га	35,2	41,4	42,5	40,0	36,7	42,9	44,6	41,0	37,1	43,1	44,5	42,0
Число поливов	17	12	12	14	19	15	14	16	22	19	20	20
Межполивной период, дн.	7	10	10	9	6	7	8	7	5	6	7	6

**Методика.** Исследования проводили в условиях Мичуринского сада Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева. Стационарный полевой опыт был заложен осенью 2019 г. Схема эксперимента предусматривала изучение следующих вариантов: режим капельного орошения (фактор А) – без полива, поддержание влажности в корнеобитаемом слое в диапазоне 60...80 % наименьшей влагоемкости (НВ) почвы, 70...90 % НВ и 80...100 % НВ; сорт малины (фактор В) – Солнышко, Награда. Повторность опыта трехкратная, расположение делянок рендомизированное. В каждой повторности было высажено по 39 растений: расстояние между рядами – 1,0 м, между растениями в ряду – 0,6 м.

Почва опытного участка дерново-подзолистая, хорошо окультуренная, грунтово-глееватая, глубокопахотная, среднесуглинистая на моренном суглинке, подстилаяемая на глубине 130...170 см подморенными песками. Наименьшая ее влагоемкость в пахотном горизонте составляет 31,7% от массы почвы, среднее содержание гумуса 3,5%, реакция среды – слабокислая (рН<sub>KCl</sub> = 5,64), содержание P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и K<sub>2</sub>O (по Кирсанову) – 372 мг/кг и 453 мг/кг, N-NH<sub>4</sub> – 37 мг/кг, N-NO<sub>3</sub> – 4 мг/кг.

Для полива использовали линию капельного орошения. Расстояние между капельницами 60 см, средний расход воды – 1,2 л/час. По мере роста корневой системы малины глубину промачивания почвы изменяли следующим образом: 2020 г. – 30 см, 2021 г. – 40 см и 2022 г. – 50 см. Поливы проводили, исходя из результатов определения влажности почвы термостатно-весовым методом. Пробы почвы отбирали с периодичностью один раз в три дня, а также перед и после выпадения осадков. Суммарное водопотребление малины определяли по основным составляющим уравнения водного баланса. Данные об осадках взяты с Метеорологической обсерватории имени В. А. Михельсона. Биометрические показатели саженцев измеряли общепринятыми методами [9]. Экспериментальные данные обрабатывали методом дисперсионного анализа с расчетом критерия наименьшей существенной разности (НСР) при 5%-ном уровне значимости.

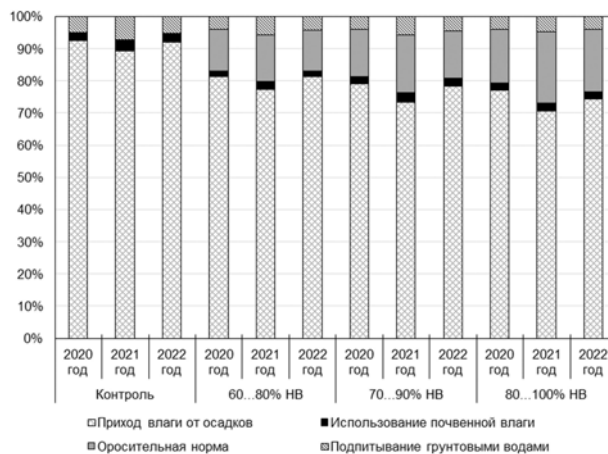
**Результаты и обсуждение.** В засушливые и жаркие вегетационные периоды оросительная и поливная нормы, количество поливов увеличивались, а межполивной период сокращался (табл. 1). С повышением поддерживаемой влажности в корнеобитаемом слое происходило повышение оросительной и поливной нормы, а также числа проводимых поливов, но сокращался межполивной период. В среднем для варианта с поддержанием влажности почвы в диапазоне 60...80 % НВ оросительная норма составила 535 м<sup>3</sup>/га, межполивной период 9 дн., 70...90 % НВ – 655 м<sup>3</sup>/га и 7 дн., 80...100 % НВ – 835 м<sup>3</sup>/га и 6 дней.

Капельное орошение малины позволяет значительно экономить поливную воду. Ранее было установлено, что при ее поливе по бороздам оросительная норма составляет 2400 м<sup>3</sup>/га [9]. В варианте с капельным ороше-

нием и поддержанием влажности в корнеобитаемом слое в диапазоне 80...100 % НВ экономия поливной воды, по сравнению с поливом по бороздам, составила в среднем 65 %, а в варианте 60...80 % НВ – 78 %. При этом применение локального орошения обеспечивает формирование оптимального водно-воздушного режима почвы.

В вариантах опыта с орошением основная часть в суммарном водопотреблении приходится на атмосферные осадки (от 71 до 81%). Их доля в более влажные годы (2020 и 2022 гг.) увеличивается, в засушливые (2021 г.) – снижается. С ростом поддерживаемой влажности в корнеобитаемом слое почвы происходило снижение доли атмосферных осадков в суммарном водопотреблении (рис. 1). Вклад оросительной нормы составлял от 15 до 22 % и возрастал с повышением величины поддерживаемой влажности корнеобитаемого слоя почвы. В контроле, где орошение не проводили, основная часть водопотребления (89...92 %) приходится на влагу от осадков и незначительная доля (около 10 %) на грунтовые воды и почвенную влагу.

При расчете основных биоклиматических коэффициентов [10] эмпирический параметр (изменение водопотребления (м<sup>3</sup>/га) при увеличении температуры на 1 °С), характеризующий расход воды малиной, для формулы И. А. Шарова в контрольном варианте составил 1,14, в варианте с 60...80 % НВ – 1,30, с 70...90 % НВ – 1,35, с 80...100 % НВ – 1,40. Биофизический коэффициент (изменение водопотребления (м<sup>3</sup>/га) при увеличении температуры на 1 °С) для формулы Г. К. Льгова в контроле был равен 1,42, в варианте с 60...80 % НВ – 1,62, с 70...90 % НВ – 1,68, с 80...100 % НВ – 1,74. То есть, наибольшими величинами биоклиматических коэффициентов выделяется вариант опыта с поддержанием влажности в корнеобитаемом слое на уровне 60...80% НВ, в котором малина отличается наиболее развитыми подземными и надземными органами.



**Рис. 1. Структура суммарного водопотребления малины в зависимости от режима полива.**



**Табл. 2. Диаметр штамба растений сортов малины в зависимости от режима орошения, мм**

Режим орошения (фактор А)	Сорт (фактор В)	Год		
		2020	2021	2022
Без орошения	Награда	9,0	9,4	9,9
	Солнышко	7,1	7,3	7,8
	среднее	8,1	8,4	8,9
60...80 % НВ	Награда	10,2	10,4	10,7
	Солнышко	8,1	8,2	8,4
	среднее	9,2	9,3	9,6
70...90 % НВ	Награда	11,1	11,2	11,4
	Солнышко	9,4	9,7	10,0
	среднее	10,3	10,5	10,7
80...100 % НВ	Награда	12,1	12,3	12,6
	Солнышко	10,3	10,4	10,7
	среднее	11,2	11,4	11,7
Среднее	Награда	10,6	10,8	11,2
	Солнышко	8,7	8,9	9,2
	среднее	9,7	9,9	10,2
НСР <sub>05</sub> А		0,8	0,9	1,1
НСР <sub>05</sub> В		0,7	1,1	1,0
НСР <sub>05</sub> АВ		1,7	2,2	2,1

Диаметр штамба саженцев относится к важным биометрическим показателям, которые позволяют судить об их качестве (табл. 2). У растений сорта малины Награда во всех вариантах и во все годы исследований величина этого показателя была значительно выше, чем у сорта Солнышко. В конце первого года проведения исследований (2020 г.) проявились различия по вариантам орошения. Наибольший диаметр штамба отмечен при поддержании влажности в корнеобитаемом слое почвы 80...100 % НВ: для сорта Награда – в среднем 12,1 мм, для сорта Солнышко – 10,3 мм. По отношению к контролю (без орошения), для сорта Награда он в среднем был больше на 34 %, сорта Солнышко – 45 %. На второй и третий годы исследования эта закономер-

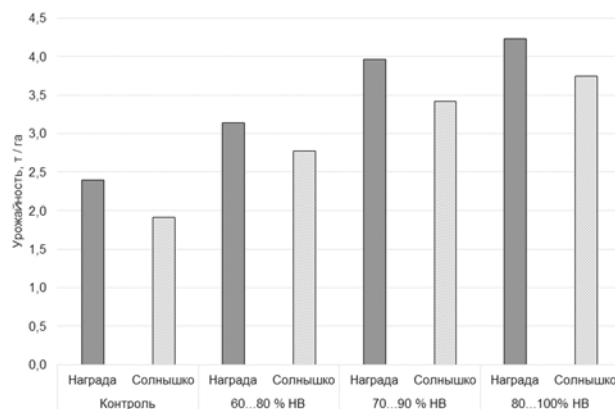
**Табл. 3. Высота растений сортов малины в зависимости от режимов орошения, см**

Режим орошения (фактор А)	Сорт (фактор В)	Год		
		2020	2021	2022
Без орошения	Награда	131	141	152
	Солнышко	118	127	137
	среднее	124	134	144
60...80 % НВ	Награда	158	171	183
	Солнышко	137	148	160
	среднее	148	160	172
70...90 % НВ	Награда	171	185	200
	Солнышко	161	174	187
	среднее	166	180	194
80...100 % НВ	Награда	192	208	222
	Солнышко	179	193	207
	среднее	186	200	214
Среднее	Награда	163	176	189
	Солнышко	149	160	173
	среднее	156	168	181
НСР <sub>05</sub> А		9	9	10
НСР <sub>05</sub> В		3	3	4
НСР <sub>05</sub> АВ		14	14	15

ность сохранялась. В 2022 г. в варианте 80...100 % НВ для сорта Награда диаметр штамба в среднем составил 12,6 мм (+27 % к контролю), для сорта Солнышко – 10,7 мм (+37 % к контролю).

Наибольшая в опыте высота растений малины отмечена при поддержании предполивного порога не ниже 80 % НВ (табл. 3). По сравнению с контролем, в этом варианте она была на 40...50 % больше, а с вариантом поддержания предполивного порога не ниже 60 % – на 20...30 %. Кроме того, на высоту малины оказали влияние сортовые особенности. Так, растения сорта Награда в среднем на 5...15 % выше, чем сорта Солнышко.

Нормы полива оказывают существенное влияние на урожайность малины (рис. 2). При поддержании предполивной влажности не ниже 60 % НВ у сорта Награда она возрастает, по сравнению с контролем, с 2,4 т/га до 3,1 т/га, сорта Солнышко – с 1,9 до 2,8 т/га. В варианте с поддержанием влажности корнеобитаемого слоя почвы в диапазоне 80...100 % НВ величины этого показателя были равны соответственно в среднем 4,2 и 3,8 т/га, что в 2 раза выше контроля. Капельное орошение не сказалось на биохимическом составе плодов. Содержание микро- и макроэлементов, а также тяжелых металлов было ниже уровня, установленного стандартами, предъявляемыми к ягодной продукции.



**Рис. 2. Урожайность сортов малины в зависимости от режимов орошения (2022 г.), т/га.**

**Выводы.** Капельное орошение способствует экономии поливной воды и созданию оптимального водно-воздушного режима почвы в течение всего вегетационного периода. При поддержании влажности в корнеобитаемом слое в диапазоне 80...100 % НВ экономия воды, по сравнению с поливом по бороздам, составляет в среднем 65 %, 60...80 % НВ – 78 %. Капельное орошение способствует формированию саженцев с наибольшими биометрическими показателями и повышению урожайности культуры. В качестве оптимальных рекомендуются режимы орошения с поддержанием влажности корнеобитаемого слоя почвы в диапазоне 70...90 % НВ и 80...100 % НВ.

**Литература.**

1. Арифова З.И., Арсланова Л. Э. Хозяйственная и экономическая эффективность возделывания новых и районированных сортов малины // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2022. № 98. С. 35–40. doi: 10.21515/1999-1703-98-35-40.
2. Distribution and occurrence of plant-parasitic nematodes associated with raspberry (*Rubus idaeus*) in Souss-

- Massa region of Morocco: relationship with soil physico-chemical factors* / F. Mokrini, S. E. Laasli, D. Iraqui, et al. // *Russian Journal of Nematology*. 2019. Vol. 27. No. 2. P. 107–121. doi: 10.24411/0869-6918-2019-10011.
3. Волчек А.А., Рой Ю. Ф., Санелина Е. А. Эффективность капельного орошения малины ремонтантной в условиях Юго-Западной части Беларуси // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2015. № 41. С. 118–121.
  4. Санелина Е.А., Рой М. Ю. Сочетание регулируемых факторов для получения различных уровней урожайности малины ремонтантной в условиях Юго-Западной части Беларуси // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2016. № 44. С. 139–143.
  5. Кружилин И.П., Никольская О. А. Обоснование водного режима почвы и регламента капельного полива саженцев черешни // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2021. № 2. С. 9–13. doi: 10.31857/S2500262721020022.
  6. Dubenok N.N., Gemonov A. V., Lebedev A. V. Moisture consumption by plum seedlings under drip irrigation in the Central Nonchernozem zone of Russia // *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2020. Vol. 15. No. 2. P. 191–199. doi: 10.22363/2312-797X-2020-15-2-191-199.
  7. Создание эффективных экологически безопасных технологий и технических средств орошения нового поколения / С. Я. Семенов, М. Н. Лытов, Е. И. Чушкина и др. // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2018. № 2 (50). С. 64–71.
  8. Майер А.В., Бочарников В. С., Долгополова Е. А. Разработка технических средств и метод определения интервала времени между увлажнениями в системе комбинированного орошения // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2012. № 1 (25). С. 150–155.
  9. Ясониди О.Е., Торбовский В. И. Возделывание малины при орошении в Ростовской области. Новочеркасск: НИМИ, 1990. 27 с.
  10. Дубенок Н.Н., Гемонов А. В., Лебедев А. В. Технология возделывания саженцев сливы в плодовом питомнике при капельном орошении в условиях Нечерноземной зоны России. М.: Проспект, 2023. 136 с.

**Поступила в редакцию 15.02.2023.**

**После доработки 01.03.2023**

**Принята к публикации 16.03.2023**

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ ПАСТБИЩНЫХ ЭКОСИСТЕМ АРИДНОЙ ЗОНЫ\*

А.Н. Салугин, доктор сельскохозяйственных наук

Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций  
и защитного лесоразведения Российской академии наук,  
400062, Волгоград, Университетский просп., 97  
E-mail: saluginan@mail.ru

*Новые подходы к изучению динамики сукцессий основаны на оригинальной концепции системной динамики, которую использовали при разработке имитационных моделей, отражающих динамику пастбищных экосистем. Временная динамика почвенно-растительного покрова естественных пастбищ Чёрных земель Калмыкии отражает деградационные процессы, которые исследуются имитационным моделированием. Процессы деградации пастбищ в субаридном поясе юга России описывали обыкновенными дифференциальными уравнениями. Эта концепция выступает базовой в разработке имитационных моделей. Динамику изменения эффективных покрытий для фитоценозов пастбищ Чёрных земель в процессе деградации прослеживали от исходных пастбищ до полного опустынивания. Аналитические решения для различных условий сукцессионной динамики при деградации естественных пастбищных угодий представляются удобным тестом при оценке адекватности имитационного моделирования. Исходные временные ряды космических наблюдений за эффективными покрытиями фитоценозов использовали для параметризации имитационных моделей. Модели реализованы в системе имитационного моделирования AnyLogic. Процесс разработки модели основан на визуальном программировании с использованием графического интерфейса пользователя. Информационные потоки в среде AnyLogic перераспределяются с течением времени по системе накопителей, связанных между собой ориентированным графом модели. Вычислительный эксперимент, демонстрирующий результаты имитации с различными параметрами, использовали для ориентировочной (качественной) оценки экосистемной устойчивости. Результаты аналитического моделирования с использованием обыкновенных дифференциальных уравнений и имитационное моделирование показали высокую идентичность. Исследование динамики пастбищных экосистем с использованием вариационного эксперимента демонстрирует возможность визуального (когнитивного) подбора параметров модели, отвечающей условиям стационарности пастбищных экосистем. Изучение динамики сукцессий пастбищных фитоценозов рассматриваемым методом открывает новые возможности для решения задач оптимального использования биоресурсов и устойчивости пастбищных экосистем.*

## SIMULATION OF DEGRADATION OF PASTURE ECOSYSTEMS OF ARID ZONE

A.N. Salugin

Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation  
of the Russian Academy of Sciences,  
400062, Volgograd, Universitetskij prosp., 97  
E-mail: saluginan@mail.ru

*New approaches to the study of succession dynamics are based on the original concept of system dynamics, which was used in the development of simulation models reflecting the dynamics of pasture ecosystems. The temporal dynamics of the soil and vegetation cover of the natural pastures of the Black Lands of Kalmykia reflects the degradation processes that are studied by simulation modeling. The processes of pasture degradation in the subarid belt of Southern Russia were described by ordinary differential equations. This concept is the basic one in the development of simulation models. The dynamics of changes in effective coatings for phytocenoses of pastures of Black Lands in the process of degradation was traced from the original pastures to complete desertification. Analytical solutions for various conditions of succession dynamics in the degradation of natural pasture lands are a convenient test for assessing the adequacy of simulation modeling. The initial time periods of space observations of effective coatings of phytocenoses were used to parametrize simulation models. The models are implemented in the AnyLogic simulation system. The model development process is based on visual programming using the graphical user interface. Information flows in the Anylogic environment are redistributed over time through a system of storage devices interconnected by an oriented graph of the model. A computational experiment demonstrating simulation results with different parameters was used for an indicative (qualitative) assessment of ecosystem sustainability. The results of analytical modeling using ordinary differential equations and simulation modeling showed a high identity. The study of the dynamics of pasture ecosystems using a variation experiment demonstrates the possibility of visual (cognitive) selection of the parameters of the model that determines the conditions of stationarity of pasture ecosystems. Studying the dynamics of successions of pasture phytocenoses by this method opens up new opportunities for solving problems of optimal use of biological resources and sustainability of pasture ecosystems.*

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, системы дифференциальных уравнений, динамика сукцессий, экстремальные точки, биоразнообразие, управление биоресурсами.

**Key words:** simulation modeling, differential equation systems, dynamics of succession, extreme points, biodiversity, bioresource management.

Проблемы опустынивания юго-запада Европейской части России в последние годы существенно обострились в связи с изменением климата [1, 2, 3]. Чёрные Земли

Калмыкии, обладающие уникальными продуктивными естественными пастбищами, в течение многих лет подвергались антропогенному воздействию (превышение

\* работа выполнена в рамках Государственного задания № 122020100450-9 «Разработка новой методологии оптимального управления биоресурсами в аэроландшафтах засушливой зоны РФ с использованием системно-динамического моделирования почвенно-гидрологических процессов, комплексной оценки влияния климатических изменений и антропогенных нагрузок на агробиологический потенциал и лесорастительные условия».



пастбищной нагрузки, распашка и др.). Проблема сохранения почвенно-растительных систем (ПРС) в этой зоне решается с привлечением математического моделирования процессов их разрушения и восстановления, которые сопровождаются сукцессионными сменами фитоценозов [1, 2, 3]. В сочетании с современным технологическим и информационным прорывом системная динамика Форрестера [4] предоставляет исследователю уникальные возможности для построения имитационных моделей динамики экологических процессов. Имитационные модели деградации ПРС реализованы с применением системной динамики, которую в последние годы широко используют в разделах динамической экологии. Системная динамика помогает понять, как развивается и эволюционирует растительность в естественных условиях с учетом климатических изменений и антропогенных нагрузок. В нашем случае имитационная модель предоставляет исследователю ценную информацию о динамике пастбищных экосистем. После испытания на конкретных примерах она может оказаться адекватной наблюдениям или наоборот, выявляя «физику» процессов с построением возможных альтернатив.

В агроэкологии, наряду с наблюдением, измерением и экспериментом, математическое моделирование выступает самостоятельным методом научного исследования [5, 6, 7]. Имитационную модель можно рассматривать как метод, объединяющий математику и эксперимент. Эффективность результатов имитационного представления возрастает с увеличением доступности имитационного моделирования и развитием компьютерных технологий [7]. Для агроэкологии это особенно важно, так как часто объект ее исследования может быть недоступен из-за отсутствия данных о его строении, динамике развития или просто, если объект прекратил свое существование, например, в результате экологической катастрофы [8, 9, 10]. Преимуществом имитационного моделирования заключается в том, что исследователь может экспериментировать на виртуальном образе в виде формальной математической конструкции.

Имитационная модель отражает свойства оригинала (объекта), учитывая его структуру и взаимодействие с окружением, описывает динамику функционирования и эволюцию в пространстве и времени. Сукцессии, как пример таких процессов, в пастбищных ПРС адекватно описывают обыкновенные дифференциальные уравнения (ОДУ) на языке системной динамики [4]. Следует отметить, что объекты имитации в агроэкологии могут быть весьма различными по своей природе (биотическими и абиотическими, пространственно-протяженными и локальными, почвенными, растительными, лесными, степными и др.). Элементы агроэкосистем взаимодействуют между собой по горизонтали и вертикали различных иерархических уровней их организации. Они, как правило, выступают адекватными и изменяются во времени и пространстве. Агроэкосистемы в процессе эволюции перестраиваются, проявляя в свете общей теории систем эмерджентность и синергетическую самоорганизацию [6, 11, 12].

Цель исследования – разработать имитационную модель деградации почвенно-растительных систем на пастбищах, подверженных антропогенному влиянию и изменению климатических условий.

**Методика.** Возможности имитационной модели деградации ПРС с использованием имитационной среды AnyLogic 8.0 демонстрируются на примере Чёрных земель Калмыкии. Пакет имитационного моделирования фирмы XJ Technologies AnyLogic имеет удобный интерфейс с оригинальной реализацией системной динамики [4]:

в начале создаётся модель, а затем (или параллельно) настраивается презентация – наглядный показ результата ее работы в графическом режиме с динамикой во времени. Программа позволяет создавать модели и презентации, предоставляя разработчику готовые блоки в виде графических элементов, в которых скрыта вычислительная часть модели, массивов для графических построений и оптимизации. Пакет имеет ряд предварительно настраиваемых шаблонов, помогающих значительно ускорить реализацию модели. Важной особенностью выступает то обстоятельство, что алгоритмы разрабатываемой модели и вычислений реализованы на языке Java. Это позволяет избежать ошибок вычислительного характера, ускоряя отладку модели. Виртуальный алгоритм машин Java отслеживает и предотвращает сбои от подобных ошибок. Имитационные модели сукцессионных процессов в пастбищных ПРС были составлены с использованием аналитического моделирования [12].

Деградацию ПРС изучали по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в виде тренда (временного ряда) площадей пастбищных фитоценозов четырех классов опустынивания (S1 – слабосбитые злаково-прутняково-белополюнные пастбища, S2 – умеренно и сильносбитые злаково-белополюнные и тырсовые, S3 – сильносбитые пастбища и S4 – разбитые пески). Причины деградации, приводящие к наблюдаемым кривым тренда, обсуждены в работах [12, 13, 14], в которых выявлены различия динамики сукцессий в зависимости от схемы связей в орграфе модели, обнаружена чувствительность сукцессионных процессов к пастбищной нагрузке. Исследованная в этом контексте устойчивость ПРС и полученные результаты стимулировали использование имитационного моделирования в свете решения практических задач.

Устойчивость ПРС как способность сохранять биомассу вследствие самовосстановления (что весьма важно для решения задач оптимального природопользования) обеспечивает стационарное функционирование агроландшафтов в целом. Система ОДУ, использованная в предыдущих исследованиях [12, 14], имеет «жесткую» конструкцию, не позволяющую изменять параметры модели из-за линейности. Кроме того, в ее рамках не учитывали в явном виде влияние численности скота.

Превышение пастбищной нагрузки приводит к деградации пастбищной экосистемы, коренным образом изменяя естественное развитие фитоценозов, которые находятся в динамическом равновесии с окружающей средой (биосферой). Взаимодействия между элементами биологических систем в процессе эволюции регулируются законами биогеоценоза, обеспечивающего стационарность (устойчивость) агроэкосистем [10, 15]. Эти эколого-биологические концепции выступают базой имитационного моделирования при их изучении. Концепция системной динамики, как отмечено ранее, служит методологической основой имитационного моделирования с учетом балансовых соотношений и законов сохранения. Не менее важную роль играют экспертные знания, участвующие при формализации задачи.

Исходной информацией для составления имитационной модели служили данные ДЗЗ в виде повторных снимков, отражающих тренд ПРС [15, 16, 17]. Вычислительный эксперимент, демонстрирующий поведение ПРС на временных интервалах 10...100 лет, позволяет «разыграть» их в режиме презентации за секунды модельного компьютерного времени. Визуализация в интерактивном режиме даёт возможность когнитивно направлять компьютерный эксперимент в нужном направлении, способствуя быстрому достижению цели моделирования.

Модель, представлена оргграфом (рис. 1), на котором разрушение ПРС (стрелки вправо) сопровождается восстановлением (стрелки влево). Сохранение фитоценоза в схеме моделируется петлёй (дуга с одинаковыми индексами). Соответствующая система дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\frac{dS_i}{dt} = \sum_{j=1}^4 \alpha_{ij} S_j, \quad j = 1, \dots, 4, \quad (1)$$

где  $S_i$  – площадь  $i$ -го фитоценоза,  $a_{ij}$  – коэффициенты, характеризующие интенсивности переходов между  $i$ -м и  $j$ -м фитоценозами.

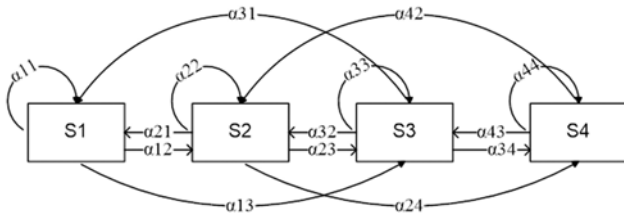


Рис. 1. Ориентированный граф сукцессионных переходов на пастбищах Черных земель Калмыкии:  $S_i$  – площади фитоценозов;  $a_{ij}$  – интенсивность сукцессий при переходе из  $i$ -го в  $j$ -е состояние ( $i < j$  – разрушение  $i > j$  – восстановление) [15] (индексы на дугах обозначены цифрами:  $a_{ij} \rightarrow a_{ij}$ ).

Первое уравнение системы (1)  $dS_1 / dt = -\alpha_{12} S_1 + \alpha_{12} S_2$  системной динамики описывает взаимодействие между первым  $S_1$  (слабосбитые злаково-прусняково-белопольные пастбища) и вторым  $S_2$  (умеренно и сильносбитые злаково-белопольные и тырсовые) фитоценозами: с интенсивностью  $a_{12}$  фитоценоз  $S_1$  «освобождает» проективное покрытие (знак у  $a_{12}$  отрицательный) фитоценозу  $S_2$ . В свою очередь  $S_2$  возвращает часть своего пространства фитоценозу в  $S_1$  с интенсивностью  $a_{21}$  (знак положительный). Величины  $S_j$  измеряются в относительных единицах. Опустынивание означает, что разрушение протекает с коэффициентом деградации  $a_{12}$ , а восстановление – с коэффициентом  $a_{21}$ . Более разнообразными вариантами сукцессионных переходов обладают фитоценозы  $S_2$  и  $S_3$ , имеющие степень инцидентности на графе модели, равную четырём. Фитоценоз  $S_2$  по дугам ( $a_{23}$  и  $a_{12}$ ) разрушается, восстанавливаясь по дугам ( $a_{12}$  и  $a_{32}$ ). Дифференциальные уравнения для  $S_3$  (сильносбитые пастбища) и  $S_4$  (разбитые пески) системы (1) конструируются аналогично.

Система (1) с математической точки зрения представляет собой классическую задачу Коши с начальными условиями в виде исходных площадей  $S_i$  по данным ДЗЗ. Коэффициенты  $a_{ij}$  определяли на предварительном этапе. Было установлено, что изменения площадей с разной степенью деградации во времени различны. Кривые  $S_1(t)$  и  $S_4(t)$  изменяются монотонно, без экстремумов: исходные пастбища экспоненциально уменьшаются, а площадь разбитых песков возрастает по логистическому закону с выходом на «плато». Для  $S_2$  и  $S_3$  картина иная – обе кривые с экстремумами. Площадь  $S_2$  в начале плавно возрастает, достигая некоторого максимального значения через  $20 \pm 5$  лет от начала деградации, а затем спадает, приближаясь к нулевой отметке к 50-му году наблюдений. Аналогично ведет себя  $S_3$  с экстремальной точкой  $30 \pm 5$  лет [12, 14].

**Результаты и обсуждение.** Имитационное моделирование в среде AnyLogic осуществляли по ранее упомянутой схеме (см. рис. 1) и уточняли в вычислитель-

ном эксперименте. В результате имитационные модели представляли собой проекты системной динамики в виде системы ОДУ (1). Переходы между состояниями фитоценозов моделировали с использованием накопителей, представляющими собой решения ОДУ (1). Накопитель, как элемент библиотеки системной динамики, содержит необходимую информацию о начальном состоянии объекта с правой частью дифференциального уравнения. Параметры ИМ указываются в окне свойств соответствующего элемента имитации. После переноса из палитры инструментов и добавления необходимых элементов системной динамики на главную панель запускается презентация. Процесс имитации демонстрирует изменение содержания накопителей в режиме модельного времени.

На схеме имитационной модели для системы (1), изображенной в виде графа (см. рис. 1), накопители  $S_1, S_2, S_3$  и  $S_4$  – площади соответствующих фитоценозов. Параметры ( $a_{ij}$ ) содержат информацию об интенсивностях сукцессионных переходов и расположены внутри соответствующих связей (рис. 2а). Результаты имитационной модели, представленные в виде временного графика (рис. 2б), выступают визуальной (когнитивной) иллюстрацией процессов деградации пастбищной экосистемы, при приближении ПРС к катастрофическому состоянию, когда естественные пастбища практически уничтожены ( $S_1$ ), а их место занимают разбитые пески ( $S_4$ ). Подобная динамика исследована экспериментально с использованием Марковских цепей в работах [16, 17, 18]. Следует отметить, что объединение непрерывных и дискретных формализмов при моделировании сукцессионных явлений открывает новые, пока ещё не раскрытые возможности методов математического моделирования в этой области.

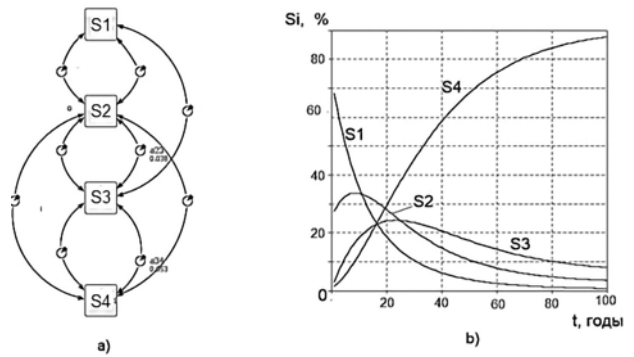


Рис. 2. Структура диаграммы (а) и результаты имитационного моделирования (б) сукцессионных переходов для пастбищной ПРС ( $S_i$  – площади фитоценозов).

**Выводы.** Пакет AnyLogic служит удобным инструментом, значительно ускоряющим разработку динамических моделей в динамической экологии. Программа позволяет быстро разрабатывать модели посредством объединения и настройки готовых элементов системной динамики, представляя результаты моделирования в удобном виде. AnyLogic при необходимости даёт исследователю возможность разрабатывать собственные классы объектно-ориентированного программирования.

Приведённая в работе имитационная модель выступает аналогом математической модели, на базе системы обыкновенных дифференциальных уравнений в приближении постоянных коэффициентов.

## Литература

1. Логофет Д.О., Маслов А.А. Анализ мелкомасштабной динамики двух видов-доминантов в сосняке чернично-бруснично-долгомошном II. Неоднородная Марковская цепь и осредненные показатели // Журн. общ. биологии. 2018. Т. 79. № 2. С. 135–147.
2. Логофет Д.О., Уланова Н.Г. От мониторинга популяции к математической модели: новая парадигма популяционного исследования // Журн. общ. биологии. 2021. Т. 82. № 4. С. 243–269. doi: 10.31857/S0044459621040035.
3. Куст Г.С., Андреева О.В., Лобковский В.А. Нейтральный баланс деградации земель – современный подход к исследованию засушливых регионов на национальном уровне // Аридные экосистемы. 2020. Т. 26. № 2 (83). С. 3–9. doi: 10.1134/S2079096120020092.
4. Касталевский Д.Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении. М.: Издательский дом «Дело», 2015. 496 с.
5. Rykh Y.A. Lyapunov-Meyer functions and distance measure from generalized Fisher's equations // IFAC-PapersOnLine. 2015. No. 48 (11). P. 115–119.
6. Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Основания синергетики. Режимы с обострением, самоорганизация, темпомеры. СПб.: Алтейя, 2002. 414 с..
7. Добровольский Г.В. Тихий кризис планеты // Вестник РАН. 1997. Т. 4. №. 67. С. 313–320.
8. Петропавловский Б.С, Варченко Л.И. Использование информационной статистики для изучения экологии растительности и динамических процессов растительного покрова земли // Сибирский экологический журнал. 2021. № 28 (3). С. 263–273. doi: 10.15372/SEJ20210301.
9. Черкашин А.К, Бибаева А.Ю. Натурные и дистанционные исследования и математическое моделирование горностепных экосистем на ландшафтной основе // Аридные экосистемы. 2020. Т. 26. № 4 (85). С. 108–115. doi: 10.24411/1993-3916-2+020-10125.
10. Миркин Б.М., Наумова Л.Г., Соломещ А.И. Современная наука о растительности: учебник. М.: Логос, 2002. 264 с.
11. Vlasenko M.V, Kulik A.K., Salugin A.N. Evaluation of the ecological status and loss of productivity of arid pasture ecosystems of the Sarpa lowland // Arid Ecosystems. 2019. No. 9 (4). P. 273–281. doi: 10.1134/S2079096119040097.
12. Салугин А.Н, Власенко М.В. Аналитическое моделирование деградации аридных пастбищ // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2021. № 3 (63). С. 366–376. doi: 10.32786/2071-9485-2021-03-38.
13. Виноградов Б.В. Основы ландшафтной экологии. М.: ГЕОС, 1998. 418 с.
14. Салугин А.Н. Численное моделирование сукцессионных переходов в агроэкологии // Российская сельскохозяйственная наука. 2020. № 1. С. 62–65. doi: 10.31857/S2500-2627-2020-1-62-65.
15. Salugin A.N., Vlasenko M.V. Mathematical models of the dynamic stability of arid pasture ecosystems in the south of Russia // Agronomy. 2022. No. 12 (6). P. 1448. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/6/> (дата обращения: 10.03.2013). doi: 10.3390/agronomy12061448.
16. Гусев А.П. Закономерности долговременной динамики локальных геосистем юго-востока Беларуси // Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2022. Т. 8 (74). № 2. С. 60–70.
17. Обратный прогноз подтверждает вывод о жизнеспособности ценопопуляции растений / Д.О. Логофет, Е.С. Казанцева, И.Н. Белова и др. // Журн. общ. биологии. 2020. Т. 81. № 4. С. 257–271. doi: 10.31857/S0044459620040041.
18. Маслов А.А, Логофет Д.О. Совместная динамика популяций черники и брусники в заповедном послепожарном сосняке-зеленомошнике. Модель с осредненными вероятностями перехода // Журн. общ. биологии. 2020. Т. 81. № 4. С. 243–256. doi: 10.31857

Поступила в редакцию 17.01.2023  
 После доработки 09.02.2023  
 Принята к публикации 01.03.2023



## ПРОДУКТИВНОСТЬ СОРГО САХАРНОГО В СМЕСИ С БОБАМИ КОРМОВЫМИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ

А.Ю. Тимохин<sup>1</sup>, кандидат сельскохозяйственных наук, В.С. Бойко<sup>1</sup>, доктор сельскохозяйственных наук, А.Б. Володин<sup>2</sup>, кандидат сельскохозяйственных наук, Т.Н. Нижельский<sup>1</sup>, аспирант, В.В. Михайлов<sup>1</sup>, кандидат биологических наук

<sup>1</sup>Омский аграрный научный центр,  
644012, Омск, просп. Королева, 26  
E-mail: timokhin@anc55.ru

<sup>2</sup>Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр,  
356241, Ставропольский край, Михайловск, ул. Никонова, 49

*Исследования проводили с целью изучения влияния различных условий минерального питания на продуктивность сорго сахарного в смеси с бобами кормовыми в условиях юга Западной Сибири. Работу выполняли в 2020–2021 гг. в полевом опыте в Омской области. Схема эксперимента предполагала изучение следующих вариантов: обеспеченность почвы подвижным фосфором (фактор А) – средняя (50...100 мг/кг по Ф.В. Чирикову, фон 0), повышенная (100...120 мг/кг, фон I и 140...150 мг/кг, фон II), высокая (150...200 мг/кг, фон III); фосфорное удобрение (фактор В) – P<sub>0</sub>, P<sub>60</sub>; азотное удобрение (фактор С) – N<sub>0</sub>, N<sub>30</sub>, N<sub>60</sub>. Почва опытного участка в пахотном слое в контроле характеризовалась нейтральной реакцией среды, содержанием гумуса 7,01...7,24 %, низкой обеспеченностью нитратным азотом в слое 0...0,4 м, средней – подвижным фосфором и высокой – подвижным калием в слое 0...0,2 м. Выращивание засухоустойчивых культур позволяет эффективно использовать ресурсы атмосферной и почвенной влаги. Применение минеральных удобрений также способствует экономному её расходованию на единицу урожая, существенно уменьшая коэффициент водопотребления. С повышением уровня обеспеченности фосфором отмечали тенденцию увеличения доли бобовой культуры, применение азотных минеральных удобрений повышало конкурентную способность сорго сахарного. Оптимизация условий минерального питания обеспечивала производство до 5,68 тыс. корм. ед./га и 28,29 т/га зеленой массы при 3,10 тыс. корм. ед./га и 15,38 т/га зеленой массы в контроле. Сбор более 0,5 т переваримого протеина и 60 ГДж/га обменной энергии в урожае бобово-сорговой смеси служит неплохим вкладом в систему полевого кормопроизводства лесостепи юга Западной Сибири.*

## PRODUCTIVITY OF SUGAR SORGHUM IN A MIX WITH FORAGE BEANS IN MODELING VARIOUS CONDITIONS OF MINERAL NUTRITION

A.Yu. Timokhin, V.S. Boiko, A.B. Volodin, T.N. Nizhelsky, V.V. Mikhailov

<sup>1</sup>Omsk agrarian scientific center,  
644012, Omsk, prosp. Korolova, 26  
E-mail: timokhin@anc55.ru

<sup>2</sup>North Caucasus Federal Agricultural Research Center,  
356241, Stavropol'skii krai, Mihailovsk, ul. Nikonova, 49

*The studies were carried out in 2020–2021, in the conditions of a field experiment at the hospital of the FSBSI "Omsk ASC". The purpose of the research is to study the influence of various conditions of mineral nutrition on the productivity of sugar sorghum mixed with fodder beans in the conditions of the south of Western Siberia. The scheme of the experiment involved the study of the following options: soil supply with mobile phosphorus (factor A) - medium (50 ... 100 mg / kg according to F.V. Chirikov, background 0), increased (100 ... 120 mg / kg, background I and 140 ... mg/kg, background II), high (150...200 mg/kg, background III); phosphorus fertilizer (factor B) - P<sub>0</sub>, P<sub>60</sub>; nitrogen fertilizer (factor C) - N<sub>0</sub>, N<sub>30</sub>, N<sub>60</sub>. The soil of the experimental plot was characterized by a neutral pH water of the arable layer with a humus content of 7.01 ... 7.24%, a low supply of nitrate nitrogen in a layer of 0 ... 0.4 m, an average supply of mobile phosphorus and a high supply of exchangeable potassium in a layer of 0 ... 0.2 m on control. Growing drought-resistant crops allows efficient use of atmospheric and soil moisture resources. The use of mineral fertilizers also contributes to its economical use per unit of crop, significantly reducing the value of the water consumption coefficient. The ratio of the legume and bluegrass components in the grass mixture to a certain extent depended on the conditions of mineral nutrition. With an increase in the level of phosphorus supply, there was a tendency to increase the share of legumes, the use of nitrogen mineral fertilizers increased the competitive ability of sugar sorghum. Optimization of the conditions of mineral nutrition provided up to 5.68 thousand feed units/ha and 28.29 t/ha of green mass at 3.10 thousand feed units/ha and 15.38 t/ha of green mass in the control variant. The collection of more than 0.5 ton of digestible protein and 60 GJ/ha of metabolic energy in the crop of a legume-sorghum mixture is a good contribution to the system of forage production in the forest-steppe of Western Siberia.*

**Ключевые слова:** сорго сахарное (*Sorghum saccharatum* (L.) Moench.), бобы кормовые (*Vicia faba* L.), кормопроизводство, кормовые единицы, зелёная масса, обменная энергия, переваримый протеин.

**Key words:** sugar sorghum (*Sorghum saccharatum* (L.) Moench.), fodder beans (*Vicia faba* L.), fodder production, fodder units, green mass, metabolic energy, digestible protein.

Характерная особенность климата юга Западной Сибири – неравномерное распределение осадков в летний период. При этом, согласно прогнозам климатологов, в будущем в этом регионе продолжит развиваться тен-

денция к сокращению количества осадков, что служит причиной расширения посевов таких засухоустойчивых культур, как сахарное сорго, формирующее в этих условиях высокие и стабильные урожаи [1, 2].

Интенсивное кормопроизводство направлено на максимальное использование почвенно-климатических ресурсов для накопления высоких урожаев. Биомасса сорговых культур служит высокоэнергетическим кормом с повышенным содержанием протеина и клетчатки, который отличается хорошей поедаемостью животными [2, 3]. Формирование смешанных посевов сорго и бобовых позволяет не только увеличивать питательность кормов, благодаря повышению обеспеченности протеином, но и сохранять плодородие почвы вследствие эффективного использования сорговыми азотных удобрений [4, 5].

Основной лимитирующий фактор в растениеводстве – вода. В условиях лесостепной зоны на невегетационные осадки приходится до 50 % от суммы годовых, при этом в почве аккумулируется всего 25...40 %, а остальное количество теряется на сток и физическое испарение. Следует отметить, что при жаркой и ветреной погоде весной потери влаги часто превышают количество выпавших осадков в период от схода снега до посева сельскохозяйственных культур. Применение средств интенсификации увеличивает массу растительных остатков, повышающих адсорбирующую и поглощающую поверхность почвы, что создает благоприятные условия для поглощения воды и элементов питания, положительно влияет на ее водно-физические параметры [6, 7]. Существенное влияние на размеры урожая оказывают биологические особенности культуры, почвенные и гидротермические условия, система обработки почвы, сорт и др. [8, 9]. В связи с изложенным актуальной задачей выступает оптимизация водного и питательного режимов посредством усовершенствования элементов агротехнологий выращивания сельскохозяйственных культур.

Цель исследования – изучить влияние различных условий минерального питания на продуктивность сорго сахарного в смеси с бобами кормовыми в условиях юга Западной Сибири.

**Методика.** Работу проводили в 2020–2021 гг. в длительном (с 1978 г.) стационарном опыте ФГБНУ «Омский АНЦ» в южной лесостепи Омской области (55.046561°N 73.454574°E) в зернотравном севообороте, предшественник – ячмень яровой. Площадь делянки – 360 м<sup>2</sup>, повторность трехкратная.

Объектами исследований служили сорго сахарное (среднеранний сорт Галия) в смеси с бобами кормовыми (сорт Сибирские) и лугово-чернозёмная среднеспелая, среднегумусная, тяжелосуглинистая почва с нейтральной реакцией среды пахотного слоя, содержанием гумуса 7,01...7,24 %, мощностью гумусового горизонта – 0,45 м, с низкой обеспеченностью нитратным азотом в слое 0...0,4 м, средней – подвижного фосфора и высокой – подвижного калия в слое 0...0,2 м.

Схема опыта предусматривала следующие варианты: обеспеченность почвы подвижным фосфором (фак-

тор А) – средняя (50...100 мг/кг по Ф.В. Чирикову, фон 0), повышенная (100...120 мг/кг, фон I и 140...150 мг/кг, фон II), высокая (150...200 мг/кг, фон III);

фосфорное удобрение (фактор В) – P<sub>0</sub>, P<sub>60</sub>;  
азотное удобрение (фактор С) – N<sub>0</sub>, N<sub>30</sub>, N<sub>60</sub>.

Минеральные удобрения (аммофос и аммиачную селитру) вносили весной до предпосевной культивации сеялкой СЗП-3,6. Основная обработка почвы – отвальная на глубину 20...22 см. Норма высева сорго – 20 кг/га (1 млн шт./га), бобов – 140 кг/га (0,4 млн шт./га), посев – 25 мая. Учет урожайности зеленой массы осуществляли 25 августа в фазе начала выметывания сорго. Подвижный фосфор и нитратный азот определяли по общепринятым в агрохимии методикам (ГОСТ 26488-85, ГОСТ 26204-91).

Расчет сбора кормовых единиц, переваримого протеина и обменной энергии проводили по результатам зоотехнического анализа, проведенного в ФГБУ «Центр агрохимической службы «Омский» с определением показателей питательности в компонентах травосмеси.

Метеоусловия 2020 г. были контрастными и в целом засушливыми. Увлажнение почвы к периоду посева находилось на уровне, близком к наименьшей влагоемкости. В целом период вегетации (май–август) оказался теплее обычного на 1,8 °С, в том числе май – на 4,3 °С. Прохладным выдался только июнь – 18,0 °С, что на 1,1 °С ниже средних многолетних значений. Во второй половине вегетации отмечена жаркая и засушливая погода (ГТК – 0,20...0,89). В целом, за вегетационный период количество осадков было значительно меньше нормы (64 %).

Вегетационный период 2021 г. был неблагоприятным для роста и развития агрокультур. Высокие дневные температуры воздуха в мае на фоне сильного порывистого ветра, а также резкое понижение их ночью до 0,3 °С провоцировало интенсивную потерю почвенной влаги, среднемесячная температура воздуха превышала норму на 2,8 °С. Недобор тепла в июне составил 1,1 °С, дефицит осадков – 10,3 мм, днём воздух прогревался до 32,6 °С, ночью температура опускалась до 2,8 °С. Июль также характеризовался резкими перепадами температур от 36,2 °С днём до 8,4 °С ночью, дефицит осадков за месяц составил 32,2 мм. Август характеризовался тёплой погодой, основные осадки выпали в первой и второй декадах. Их дефицит на фоне высоких температур воздуха в течение вегетации ускорил развитие и созревание сельскохозяйственных культур.

**Результаты и обсуждение.** В начальный период вегетации формирование полных всходов культуры определяет запас влаги в почве, который зависит от осенне-зимних осадков. В нашем исследовании исходный запас общей влаги в почве в среднем за 2020–2021 гг. в полуметровом слое почвы варьировал от 156 до 166 мм (86...90 % от НВ (наименьшей влагоемкости), в метровом – от 249 до 267 мм (84...90 % от НВ), при слабой

Табл.1. Исходный запас общей влаги в почве в зависимости от фона по обеспеченности фосфором

Год	Слой почвы, м	Фон по обеспеченности P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>								Среднее	
		0		I		II		III			
		мм	%НВ*	мм	%НВ	мм	%НВ	мм	%НВ	мм	%НВ
2020	0...0,6	156	85	143	78	154	84	160	87	153	83
	0...1,0	256	86	233	78	248	84	256	86	248	84
2021	0...0,6	173	94	168	91	178	97	154	84	168	91
	0...1,0	275	93	266	90	285	96	247	83	268	90
Среднее	0...0,6	165	90	156	84	166	90	157	85	161	87
	0...1,0	266	89	249	84	267	90	251	85	258	87

\*наименьшая влагоемкость (НВ) почвы для слоя 0...0,6 м – 184 мм, для слоя 0...1,0 м – 297 мм.



зависимости от фона обеспеченности подвижным фосфором (табл. 1). Запас общей влаги к посеву однолетних трав в 2020 г. был ниже, чем в 2021 г., но также оставался в интервале от ВРК (влажности разрыва капилляров) до НВ и не ограничивал начальное развитие растений.

В течение вегетации растения потребляют влагу неравномерно. Повышенная чувствительность к ее дефициту возникает в период интенсивного морфогенеза, дифференциации и максимального роста репродуктивных органов растений. Запас общей влаги в метровом слое в период активной вегетации в 2020 г. не опускался ниже 70 % от НВ вплоть до начала августа. В 2021 г. влажность почвы находилась в интервале от ВРК до ВЗ (влажность завядания), что сдерживало рост растений и не могло не сказаться на их урожайности (рис. 1).

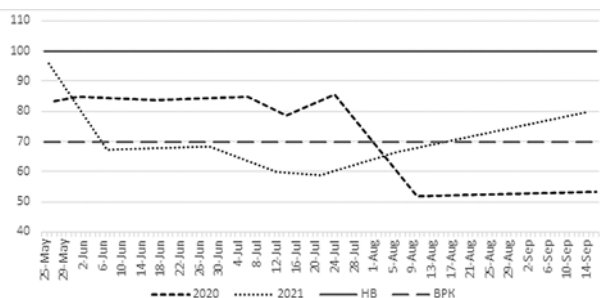


Рис. 1. Изменение содержания общей влаги в почве в зависимости от гидротермических условий вегетационного периода, слой 0...1,0 м.

Особенность потребления почвенной влаги культурами в Западной Сибири состоит в том, что она используется преимущественно из верхнего полуметра. Водопотребление травосмеси в среднем за 2020–2021 гг. варьировало от 158 до 198 мм в слое 0...0,6 м и от 172 до 217 мм в метровом слое. В вариантах с внесением минеральных удобрений ( $N_{60}P_{60}$ ) отмечали увеличение суммарного водопотребления при слабой зависимости от фона обеспеченности подвижным фосфором (табл. 2).

Улучшение условий минерального питания положительно сказывалось на коэффициенте водопотребления. Так, применение перед посевом  $N_{60}P_{60}$  снижало величину этого показателя с 36,5 до 28,8 мм/т для слоя 0...0,6 м и с 40,5 до 32,5 мм/т для слоя 0...1,0 м, или в среднем по этому фактору соответственно на 21 и 20 %. Положительная роль фонов с повышенной и высокой обеспеченностью подвижным фосфором выражалась в снижении коэффициента водопотребления в первом полуметре с 36,2 мм/т до 25,1...32,8 мм/т или на 9...31 %, в метровом слое – с 41,0 мм/т до 28,0...36,7 мм/т, что также в среднем по этому фактору на 10...32 % ниже.

Табл. 2. Водопотребление сорго сахарного в смеси с бобами кормовыми в зависимости от условий минерального питания (2020–2021 гг.)

Минеральные удобрения, кг д.в./га	Фон по обеспеченности $P_2O_5$								Среднее	
	0		I		II		III			
	0...0,6 м	0...1,0 м	0...0,6 м	0...1,0 м	0...0,6 м	0...1,0 м	0...0,6 м	0...1,0 м	0...0,6 м	0...1,0 м
<b>Суммарное водопотребление, мм</b>										
$N_{60}P_{60}$	182	206	178	205	198	217	162	184	180	203
0	178	201	171	182	185	211	158	172	173	192
среднее	180	204	174	194	192	214	160	178	176	198
<b>Коэффициент водопотребления, мм/т сухого вещества</b>										
$N_{60}P_{60}$	26,7	30,3	32,1	37,1	31,2	34,2	25,1	28,5	28,8	32,5
0	45,7	51,6	40,8	43,5	34,4	39,2	25,2	27,5	36,5	40,5
	36,2	41,0	36,4	40,3	32,8	36,7	25,1	28,0	32,6	36,5

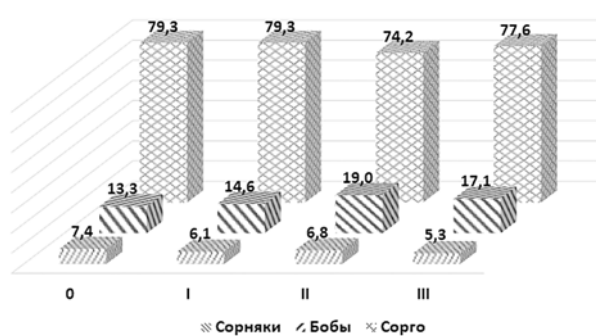


Рис. 2. Изменение ботанического состава травосмеси в зависимости от фонов с различной обеспеченностью подвижным фосфором, %.

В период уборки однолетних трав доля сорного компонента, в основном мятликовых сорняков, была невысокой – 5,3...7,4 % от биомассы. Доля бобов кормовых в среднем по опыту достигала 16,0 %, превалировало в ботаническом составе травосмеси сорго сахарное – 77,6 %. Соотношение бобового и мятликового компонентов в травосмеси в определенной степени зависело от условий минерального питания. Так, с повышением уровня обеспеченности фосфором отмечали тенденцию увеличения доли бобов кормовых с 13,3 % до 17,1...19,0 % при снижении доли сорго с 79,3 до 74,2 % (рис. 2).

Применение азотных минеральных удобрений в дозе  $N_{30}$  повышало конкурентную способность сорго сахарного и способствовало увеличению его доли в ботаническом составе травостоя с 76,7 до 81,0 % при снижении содержания бобов с 17,6 до 14,9 % и сорняков – с 5,7 до 4,1 % (рис. 3). Допосевное внесение  $N_{60}$  приводило к увеличению доли сорного компонента с 5,7 до 9,4 %. В этих условиях происходило снижение доли бобов с 17,6 до 15,5 %, сорго – с 76,7 до 75,1 % от биомассы.

Внесение фосфорсодержащих удобрений до посева достоверно увеличивало урожайность травосмеси с 19,62 до 23,57 т/га зеленой массы, или на 20 %, а сбор кормовых единиц (корм. ед.) – с 3,99 до 4,79 тыс./га. Последствие удобрений на фоне с высоким содержанием подвижного фосфора в почве выражалось в увеличении урожайности зеленой массы с 19,33 до 25,22 т/га, или с 3,92 до 5,13 тыс. корм. ед./га, что на 31 % выше (табл. 3).

Применение азотных удобрений было эффективным только в дозе 30 кг д.в. и увеличивало урожайность зеленой массы с 20,86 до 22,07 т/га (на 6 %). В целом, оптимизация условий минерального питания обеспечивала формирование до 5,68 тыс./га корм. ед. и 28,29 т/га зеленой массы при 3,10 тыс./га корм. ед. и 15,38 т/га зеленой массы в контроле. Наибольшую продуктив-

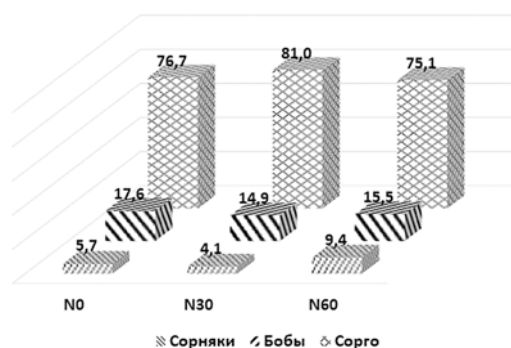


Рис. 3. Изменение ботанического состава травосмеси в зависимости от применения азотных удобрений, %.

ность – 5,84 тыс. корм. ед./га отмечали в варианте N<sub>0</sub>P<sub>60</sub> на фоне с высоким содержанием подвижного фосфора.

Как отмечено в литературе [10, 11] сахарное сорго сорта Галия довольно устойчиво к жаркому и сухому климату и рационально расходует воду, в отличие от кормовых бобов Сибирские, урожайность которых очень сильно зависит от количества атмосферных осадков [12, 13]. Поэтому сбор зеленой массы и сухого вещества сорго в смеси с бобами в условиях сухого и жаркого лета может быть ниже, чем у сорго, выращенного в монокультуре. Так, в условиях Ставропольского края максимальная продуктивность этого сорта составляла 13,09 т/га сухого вещества и 46,86 т/га зеленой массы, в Алтайском крае – 8,92 и 36,80 т/га соответственно [14, 15], что, вероятно, обусловлено более благоприятным сочетанием ресурсов тепла и влаги в конкретные годы и периоды вегетации.

Сбор переваримого протеина и обменной энергии определяли доля компонентов и их урожайность. Так, слабая реакция травосмеси урожайностью зеленой массы на азотные удобрения повторилась и в показателях выхода переваримого протеина (табл. 4). Положительная реакция бобового компонента на улучшение обеспечен-

Табл. 3. Урожайность травосмеси в зависимости от условий минерального питания (среднее за 2020–2021 гг.)

Минеральные удобрения, кг д.в./га		Фоны по обеспеченности почвы P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (фактор А)				Среднее по фактору	
фосфор (фактор В)	азот, (фактор С)	0	I	II	III	В	С
<b>Зеленая масса, т/га</b>							
0	N <sub>0</sub>	15,38	17,31	21,34	22,52	19,62	20,86
	N <sub>30</sub>	18,26	18,08	18,48	24,02		
	N <sub>60</sub>	17,24	20,01	20,45	22,39		
P <sub>60</sub>	N <sub>0</sub>	21,24	20,17	20,36	28,56	23,57	22,07
	N <sub>30</sub>	22,19	22,90	24,36	28,29		
	N <sub>60</sub>	21,66	24,45	23,13	25,58		
Среднее по фактору А		19,33	20,49	21,35	25,22		
НСР <sub>05</sub> : А – 2,82; В – 1,99; С – 2,44; для частных различий – 6,91							
<b>Продуктивность, тыс. корм. ед./га</b>							
0	N <sub>0</sub>	3,10	3,52	4,33	4,60	3,99	4,25
	N <sub>30</sub>	3,70	3,68	3,77	4,91		
	N <sub>60</sub>	3,49	4,04	4,18	4,56		
P <sub>60</sub>	N <sub>0</sub>	4,34	4,08	4,16	5,84	4,79	4,44
	N <sub>30</sub>	4,48	4,64	4,96	5,68		
	N <sub>60</sub>	4,39	4,98	4,70	5,18		
Среднее по фактору А		3,92	4,16	4,35	5,13		
НСР <sub>05</sub> : А – 0,56; В – 0,39; С – 0,48; для частных различий – 1,38							

ности фосфором выражалась как положительной тенденцией на предпосевное внесение фосфорных удобрений, так и устойчивой прибавкой от нарастающей обеспеченности подвижным фосфором вследствие последствия ранее внесенных удобрений. Предпосевное внесение фосфора эффективно на фоне со средней обеспеченностью этим элементом в вариантах без применения фосфорсодержащих удобрений в течение всего длительного периода исследований в экспериментальном зернотравяном севообороте. В целом, сбор более 0,5 т/га переваримого протеина в урожае бобово-сорговой смеси служит неплохим вкладом в систему полевого кормопроизводства для лесостепи Западной Сибири.

Выращивание изучаемой смеси энергетически также было эффективно. Сбор обменной энергии в наиболее урожайных вариантах достигал 60 ГДж/га, что почти

Табл. 4. Продуктивность травосмеси в зависимости от условий минерального питания (среднее за 2020–2021 гг.)

Минеральные удобрения, кг д.в./га		Фон по обеспеченности почвы P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (фактор А)				Среднее по фактору	
фосфор (фактор В)	азот (фактор С)	0	I	II	III	В	С
<b>Переваримый протеин, т/га</b>							
0	N <sub>0</sub>	0,36	0,42	0,51	0,56	0,48	0,51
	N <sub>30</sub>	0,43	0,44	0,46	0,60		
	N <sub>60</sub>	0,41	0,46	0,51	0,55		
P <sub>60</sub>	N <sub>0</sub>	0,53	0,47	0,51	0,72	0,57	0,53
	N <sub>30</sub>	0,51	0,54	0,59	0,64		
	N <sub>60</sub>	0,51	0,60	0,56	0,61		
Среднее по фактору А		0,46	0,49	0,52	0,61		
<b>Обменная энергия, ГДж/га</b>							
0	N <sub>0</sub>	33,08	37,40	46,08	48,82	42,42	45,13
	N <sub>30</sub>	39,40	39,13	40,05	52,07		
	N <sub>60</sub>	37,16	43,06	44,33	48,47		
P <sub>60</sub>	N <sub>0</sub>	46,08	43,47	44,15	61,96	50,91	47,64
	N <sub>30</sub>	47,75	49,38	52,68	60,69		
	N <sub>60</sub>	46,72	52,94	49,99	55,17		
Среднее по фактору А		41,70	44,23	46,21	54,53		

второе превышает ее затраты на выполнение агротехнологии [16]. С этой точки зрения азотные удобрения были также малоэффективны, как и их влияние на сбор зеленой массы, кормовых единиц и переваримого протеина. Эффективность фосфорных удобрений была выше, особенно в вариантах с длительным отрицательным балансом этого макроэлемента. Сочетание бобовой и мятликовой культур позволяет балансировать качество корма на зоотехнически и энергетически приемлемом уровне.

**Выводы.** Гидротермические условия Омской области, отличающиеся неравномерным распределением осадков в летний период и недостатком влаги в пахотном слое почвы, подходят для выращивания сахарного сорго в смеси с бобами кормовыми. Выращивание засухоустойчивых культур позволяет эффективно использовать ресурсы атмосферной и почвенной влаги. Применение минеральных удобрений также способствует экономному использованию имеющейся влаги на единицу урожая, существенно (на 10...32 %) уменьшая величину коэффициента водопотребления. Это особенно важно при сельскохозяйственном производстве в богарных условиях, где запас влаги формируется только благодаря выпадающим осадкам. Оптимизация условий питания

фосфором в сочетании с применением азотных удобрений обеспечивает рост урожайности изучаемой травосмеси, в сравнении с контролем, в 1,8 раза до 28,29 т/га зеленой массы, или 5,68 тыс. корм.ед./га. Сбор более 0,5 т/га переваримого протеина и до 60 ГДж/га обменной энергии в урожае бобово-сорговой смеси служит неплохим вкладом в систему полевого кормопроизводства лесостепи Западной Сибири.

### Литература

1. Динамика характеристик экстремальности климата и тенденции опасных метеорологических явлений на территории Западной Сибири / Е.В. Харюткина, С.В. Логинов, Е.И. Морару и др. // *Оптика атмосферы и океана*. 2022. № 2. С. 136–142. doi: 10.15372/AOO20220208.
2. Исходный материал в селекции сахарного сорго при использовании на кормовые цели / О.П. Кубальник, О.Б. Каменева, Т.В. Ларина и др. // *Journal of Agriculture and Environment*. 2022. № 1. С. 1–5. URL: <https://jae.cifra.science/index.php/jae/article/view/198/246> (дата обращения: 22.01.23). doi: 10.23649/jae.2022.1.21.13.
3. Косарева Н.А., Чаунина Е.А., Новикова Н.Н. Влияние силоса, консервированного биодобавкой, на рост и развитие молодняка крупного рогатого скота // *Вестник КрасГАУ*. 2022. № 10. С. 117–122. doi: 10.36718/1819-4036-2022-10-117-122.
4. Новикова Н.Н., Косарева Н.А. Определение концентрации биоконсерванта для получения качественного сочного корма в лабораторных условиях // *Пермский аграрный вестник*. 2022. № 2. С. 147–152. doi: 10.47737/2307-2873\_2022\_38\_147.
5. Капылович В.Л., Шестаков Н.М., Радовня В.А. Влияние азотных удобрений на рост и развитие сорго сахарного в условиях Белорусского Поселья // *Вестник Белорусской Государственной Сельскохозяйственной академии*. 2021. № 4. С. 77–81.
6. Изменение агрофизических свойств чернозёмных почв при интенсификации земледелия в лесостепи Западной Сибири / Л.В. Юшкевич, А.Г. Щитов, Д.Н. Ющенко и др. // *Пермский аграрный вестник*. 2022. № 2 (38). С. 99–105. doi: 10.47737/2307-2873\_2022\_38\_99.
7. Influence of long-term intensive use of irrigated meadow-chernozem soil on the biological activity and productivity of the arable layer / N.N. Shuliko, O.F. Khatova, A.Yu. Timokhin, et al. // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. No. 1. P. 14672. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-18639-1>. дата обращения: 22.01.23). doi: 10.1038/s41598-022-18639-1.
8. Биктимиров Р.А., Шакирзянов А.Х., Низаева А.А. Экологическая стабильность и пластичность кормового сорго в Республике Башкортостан // *Достижения науки и техники АПК*. 2019. Т. 33. № 8. С. 46–49.
9. Толкачева М.А., Амелин А.В. Оценка исходного материала для селекции бобов кормовых в условиях Центрально-Черноземного региона // *Земледелие*. 2022. № 4. С. 18–20.
10. Капустин С.И., Володин А.Б., Капустин А.С. Эффективность использования однолетних яровых кормовых культур в засушливых условиях Центрального Предкавказья // *Таврический вестник аграрной науки*. 2017. № 3. С. 72–79.
11. Шкодина Е.П. Кормовые агроценозы сорговых культур на Северо-Западе Нечерноземья // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2021. № 4. С. 531–541. doi: 10.30766/2072-9081.2021.22.4.531-541.
12. Красовская А.В., Веремей Т.В. Агротехнические приемы возделывания кормовых бобов в подтаежной зоне Западной Сибири // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2011. № 1. С. 39–42.
13. Выращивание и использование в животноводстве кормовых бобов на юге Западной Сибири / В.С. Бойко, Р.Ф. Гизатулин, Г.Е. Акифьева и др. // *Кормопроизводство*. 2016. № 3. С. 16–20.
14. Володин А.Б. Потенциал продуктивности сорго сахарного в южной лесостепи Западной Сибири // *Кормопроизводство*. 2015. № 4. С. 16–20.
15. Шукис Е.Р., Володин А.Б., Капустин С.И. Потенциал возделывания сорговых культур в Алтайском крае // *Сельскохозяйственный журнал*. 2018. № 2. С. 32–38.
16. Емельянов А.Н., Наумова Т.В. Повышение энергетической эффективности полевого кормопроизводства в Приморском крае // *Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2014. № 6. С. 47–49.

Поступила в редакцию 14.02.2023  
 После доработки 05.03.2023  
 Принята к публикации 15.03.2023



## УРОЖАЙНОСТЬ КУКУРУЗЫ И СОДЕРЖАНИЕ ПОДВИЖНОГО ФОСФОРА В ЧЕРНОЗЕМЕ ТИПИЧНОМ ПРИ РАЗНЫХ ПРИЕМАХ ОСНОВНОЙ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ ХИМИЗАЦИИ И БИОЛОГИЗАЦИИ

Х.А. Хусайнов, кандидат биологических наук, М.Ш. Гаплаев, доктор сельскохозяйственных наук,  
А.В. Тунтаев, Ф.Д. Елмурзаева

Чеченский научно-исследовательский институт сельского хозяйства,  
366021, Грозный, ул. Лиловая, 1  
E-mail: haron-h14@mail.ru

*Исследования проводили с целью изучения влияния приемов основной обработки почвы, средств химизации и биологизации на урожайность зерна кукурузы и содержание подвижного фосфора в пахотном (0...25 см) слое чернозема типичного тяжелосуглинистого среднемошного низкогумусного. Работу выполняли в 2021–2022 гг. в Чеченской Республике. Содержание гумуса (по Тюрину) в почве опытного участка составляло 3,6 %, подвижного фосфора и калия (по Мачигину) – 15 и 300 мг/кг соответственно, реакции среды – нейтральная ( $pH_{KCl} = 7,1$ ). В опыте выращивали гибрид кукурузы Пионер 9678, предшественник – озимая пшеница. Схема эксперимента предусматривала следующие варианты: прием основной обработки почвы (фактор А) – вспашка на глубину 25...30 см; дискование на 10...15 см; чизелевание на 30...40 см; удобрения, биопрепарат и последствие сидерата (фактор В) – без удобрений, биопрепарата и сидерата;  $N_{120}P_{60}K_{60}$  + сидерат; биопрепарат V417 + сидерат;  $N_{120}P_{60}K_{60}$  + V417 + сидерат. Наиболее эффективным в опыте было дискование, обеспечившее формирование урожайности зерна кукурузы на уровне 4,75 т/га, против 3,65 т/га по вспашке и 4,35 т/га после чизелевания. Содержание в почве подвижного фосфора при этом составляло соответственно 21, 15 и 16 мг/кг. Использование биопрепарата V417 в сочетании с последствием сидерата на фоне дискования обеспечивало самую высокую урожайность кукурузы в среднем за 2 года – 5,10 т/га. Наибольшее содержание подвижного фосфора – 26 мг/кг при балансе 60 кг/га с интенсивностью 236 % отмечали в варианте с дискованием, применением удобрений и биопрепарата в сочетании с последствием сидерата, что в 1,5...2,0 раза превышало величины этих показателей при вспашке и чизелевании.*

## CORN YIELD AND THE CONTENT OF MOBILE PHOSPHORUS IN TYPICAL CHERNOZEM UNDER DIFFERENT METHODS OF BASIC TILLAGE WITH THE USE OF CHEMICALIZATION AND BIOLOGIZATION MEANS

Kh.A. Khusainov, M.Sh. Gaplaev, A.V. Tuntaev, F.D. Elmurzaeva

Chechen Scientific Research Institute of Agriculture  
366021, Chechenskaya Respublika, Grozny, ul. Lilovaya, 1  
E-mail: haron-h14@mail.ru

*Studies have been carried out to study the effectiveness methods of basic tillage with the use of chemicalization and biologization means on the yield of corn and the content of mobile phosphorus in the arable (0-25 cm) layer of typical chernozem underlain by pebbles. Object of research: the soil of the experimental plot is a typical heavy loamy, medium-thick, low-humus chernozem, underlain by pebbles with an average content of humus (according to Tyurin) in the arable layer – 3.6%, mobile phosphorus and potassium (according to Machigin) – 15 and 300 mg/kg respectively. The reaction of the soil environment (by the potentiometric method) is neutral ( $pH_{KCl} = 7.1$ ). Corn for grain (hybrid Pioneer 9678) was placed in a grain-row crop rotation with alternating crops: wintering peas - winter wheat - corn for grain - spring oats. In the scheme of the experiment, the following variants were studied: reception of the main tillage (factor A) - plowing to a depth of 25 ... 30 cm, disking to a depth of 10 ... 15 cm, chiselling to a depth of 30 ... 40 cm; fertilizers and a biological product according to the aftereffect of green manure (factor B) - without fertilizers and a biological product by aftereffect of green manure, fertilizer (diammophoska, ammonium nitrate) and a biological product (V417) by aftereffect of green manure (spring rape):  $N_{120}P_{60}K_{60}$  + green manure, V417 + green manure,  $N_{120}P_{60}K_{60}$  + V417 + green manure. On average, for two years, among the methods of the main tillage during disking, the highest yield of corn for grain was obtained - 4.75 t/ha with the content of mobile phosphorus in the arable soil layer - 21 mg/kg (63 kg/ha). According to the effect of chemicalization and biologization means for different soil tillages, the use of the biological product V417 by aftereffect of green manure (spring rapeseed) against the background of disking provided the highest average yield of corn for two years - 5.10 t/ha with a content of mobile phosphorus of 21 mg/kg (63 kg/ha). On average, over two years, the highest content of mobile phosphorus - 26 mg/kg (78 kg/ha) with its balance - 60 kg/ha, with an intensity of 236%, was facilitated by disking with the combined use of fertilizers and the biological product V417 according by aftereffect of green manure. At the same time, the parameters of the variants during plowing and chiselling were exceeded by 1.5 ... 2 times. In addition, an increase in the content of mobile phosphorus in the arable layer of soil from a low (11...15 mg/kg) to an average level (16...30 mg/kg) was achieved.*

**Ключевые слова:** урожайность кукурузы, содержание и баланс подвижного фосфора, приемы основной обработки почвы, биопрепарат, сидерат, удобрения.

**Key words:** words: corn yield, content and balance of mobile phosphorus, methods of basic tillage, biological product, green manure, fertilizers.

Кукуруза обеспечивает более четверти валового сбора зерна в мире. Важнейший аспект формирования ее высоких урожаев – технология возделывания, одним из главных элементов которой выступают основная обработка почвы и удобрение. Управляя этими фак-

торами, можно увеличить продуктивность кукурузы на 23...25 %. Поэтому правильный выбор системы основной обработки почвы и применения удобрений – действенный рычаг повышения урожайности, особенно в современных условиях. Целесообразность использо-

вания того или иного способа обработки почвы зависит от конкретных условий [1, 2, 3]. Ряд авторов считают наиболее эффективной под кукурузу на зерно вспашку на глубину 28...30 см. Однако при этом происходит снижение водопрочности структуры почвы, тогда как при минимальных обработках она возрастает. Кроме того, уменьшение интенсивности рыхления обеспечивает сохранение влаги, а также улучшение структурности и плотности почвы [4].

Содержание подвижного фосфора – один из важнейших агрохимических показателей плодородия почв [5]. Хорошая обеспеченность этим минеральным элементом улучшает углеводный обмен, приводит к накоплению сахаров, что способствует повышению морозоустойчивости и зимостойкости, обеспечивает экономное расходование влаги и увеличение засухоустойчивости растений. При дефиците доступного фосфора замедляется синтез белков, возрастает содержание нитратного азота в тканях растений. При очень высоких фосфорных нагрузках может наступать отравление растений: ингибируется дыхание, замедляется скорость метаболических процессов, растения отстают в росте, урожайность сильно снижается [6, 7].

Применение систем удобрения с учетом состояния баланса элементов питания растений не только позволяет выращивать планируемые урожаи сельскохозяйственных культур, но и способствует воспроизводству плодородия почвы [8, 9, 10]. Поэтому важно правильно управлять круговоротом питательных веществ в земледелии и создавать их активный баланс путем применения минеральных удобрений, предотвращая их потери в окружающую природную среду [11].

В нашей стране в последние 20 лет происходит снижение плодородия почв пашни. В то же время в земледелии недооцениваются возможности и перспективы биологизации и ее роль в функционировании агроэкосистем. Цель биологизации земледелия – создание почвенной среды, которая способствует воспроизводству плодородия почвы путем использования и реализации всех биологических и природных факторов. Один из способов решения этой задачи – использование сидератов [12, 13].

Их мощная корневая система, пронизывая глубокие горизонты почвы, создает так называемый биологический дренаж, улучшает агрофизические и биологические свойства почвы, чего не могут сделать обычные органические удобрения. Сидераты служат неисчерпаемым, постоянно возобновляемым источником органического вещества и элементов минерального питания. Эффективность зеленого удобрения определяется не только влиянием поступающей в почву органической массы на физико-химические и биологические свойства почвы. Благодаря их использованию достигается оздоровление фитоценозов и снижение численности вредных микроорганизмов. Сидерация выступает многофакторным агротехническим приемом, оказывающим положительное комплексное влияние на почву, продуктивность и качество возделываемых культур. Низкая стоимость и высокая окупаемость, а также безопасность для окружающей среды, обуславливают их широкое использование [14, 15, 16].

В условиях адаптивного земледелия комплекс мер по увеличению производства кукурузы должен предусматривать обоснованные и экологически безопасные агроприемы ее возделывания, направленные на повышение урожайности и качества продукции. Важнейшими из них выступают оптимизация основной обработки почвы, применения минеральных удобрений и регуляторов роста [17, 18]. Повышение продуктивности кукурузы на зерно и ее устойчивость к неблагоприятным факторам

среды возможно при освоении наукоемких, энергосберегающих технологий ее выращивания. Одним из элементов таких технологий может быть использование биологических стимуляторов роста и развития растений [19, 20, 21].

Биопрепараты не только увеличивают скорость разложения послеуборочных растительных остатков, повышая биологическую активность почвы, но и улучшают водный, воздушный и питательный режимы почвы. Использование микробиологических препаратов путем усиления роста и развития растений обеспечивает более полное раскрытие потенциала сорта. Инокуляция семян биопрепаратами позволяет задействовать дополнительное количество биологического азота, повышает фосфатмобилизирующую активность, что способствует увеличению урожайности и качества сельскохозяйственных культур [22].

Цель исследований – оценка влияния приемов основной обработки почвы в комплексе с использованием средств химизации и биологизации на урожайность кукурузы на зерно и содержание подвижного фосфора в черноземе типичном, подстилаемом галечником.

**Методика.** Работу выполняли в 2021–2022 гг. на опытном поле Чеченского НИИСХ, расположенном в лесостепной природно-климатической зоне, в условиях засушливого летне-осеннего периода, на богаре. Закладку и проведение полевого опыта осуществляли по общепринятым методикам (Адиньев Э.Д., Абаев А.А., Адаев Н.Л. *Учебно-методическое руководство по проведению исследований в агрономии. Грозный: Изд-во ЧГУ, 2012. 344 с.; Нагорный В.Д. Практикум по земледелию. Учебное пособие. М.: РУДН, 2014. 182 с.; Пискунов А.С. Методы агрохимических исследований. М.: КолосС, 2004. 312 с.*)

Схема опыта предусматривала изучение следующих вариантов:

прием основной обработки почвы (фактор А) – вспашка на глубину 25...30 см плугом ПН-4–35, дискование на 10...15 см бороной БДМ-3×4, чизелевание на 30...40 см чизелем-глубококорыхлителем D 380 NS;

удобрения и биопрепарат (фактор В) – без удобрений и биопрепарата,  $N_{23}P_{60}K_{60}$  + сидерат, биопрепарат V417 + сидерат,  $N_{120}P_{60}K_{60}$  + биопрепарат V417 + сидерат.

Обработку почвы проводили весной за неделю до посева кукурузы. В качестве сидеральной культуры выращивали рапс яровой с нормой высева 15 кг/га, заделку биомассы которого проводили в фазе цветения в первой декаде сентября, предшествующих исследованиям лет. В качестве основного удобрения под предпосевную обработку почвы вручную вносили диаммофоску ( $N - 10\%$ ,  $P - 26\%$ ,  $K - 26\%$ ) в дозе  $N_{23}P_{60}K_{60}$  на планируемую урожайность кукурузы на зерно 5 т/га. Подкормку аммиачной селитрой ( $N - 34\%$ ) проводили вручную в фазе 5...8 листьев ( $N_{47}$ ) и образования метелки ( $N_{50}$ ). Биопрепарат V417 (жидкая форма) создан во ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии на основе штамма *Bacillus subtilis*, относящегося к эндофитным бактериям. Инокуляцию семян кукурузы его 10%-ным раствором из расчета 1 л на 1 т семян с расходом рабочего раствора 10 л/т проводили за 10 дней до посева. В течение вегетационного периода посевы кукурузы обрабатывали этим препаратом в дозе 2 л/га в фазы 5...8 листьев и образования метелки для стимулирования роста, увеличения урожайности и защиты от спектра фитопатогенных грибов и бактерий.

Почва опытного участка – чернозем типичный тяжелосуглинистый среднесплодный низкогумусный, подстилаемый галечником, со средним содержанием



в пахотном слое гумуса (по Тюрину) 3,6 %, подвижного фосфора и калия (по Мачигину) – 15 и 300 мг/кг соответственно. Реакция почвенного раствора (потенциометрическим методом) – нейтральная ( $pH_{KCl} = 7,1$ ). Кукурузу на зерно (гибрид Пионер 9678) размещали в зернопропашном севообороте со следующим чередованием культур: горох зимующий – озимая пшеница – кукуруза на зерно – овес яровой. Посевная площадь делянок для кукурузы на зерно составляла 90 м<sup>2</sup>. Отбор образцов из пахотного (0...25 см) слоя почвы проводили в начале и конце вегетации. Содержание подвижного фосфора в почве определяли по методу Мачигина. Повторность – 4-кратная. Учет урожая кукурузы на зерно осуществляли поделочно с последующим взвешиванием и пересчетом на 14 %-ную влажность и 100 %-ную чистоту зерна. Результаты исследований подвергали статистической обработке методом дисперсионного анализа по Б. А. Доспехову.

Количество осадков, выпадавших в течение весеннего периода 2021 г. было достаточным, основная их часть приходилась на май, при этом превышение среднемесячной нормы температуры воздуха (16,6 °С) составляло 1,3 °С, осадков (56 мм) – 33 %. С середины июня до конца августа температура воздуха устойчиво держалась в пределах 34...36 °С, в некоторые дни достигая 41...42 °С, при этом наблюдали частые суховеи, что приводило к иссушению почвы. Осадки, выпадавшие в этот период, были короткими, носили ливневый характер, слабо промачивали почву и быстро испарялись. В результате растения кукурузы испытывали так называемый «захват» из-за дефицита влаги при сильной жаре.

Весна 2022 г. была сравнительно прохладной с частыми осадками, близкими к среднемуголетнему уровню. В мае их сумма составила 98 мм, что было больше нормы на 46 %, с одновременным снижением температуры воздуха, относительно нормы (16,6 °С), на 1,5 °С. В июне при температуре, близкой к среднемуголетней, количество осадков было вдвое меньше нормы (на 41 мм). В течение летнего периода вегетации кукурузы были небольшие, но частые дожди, при температуре воздуха в пределах среднемуголетних значений.

**Результаты и обсуждение.** Среди приемов основной обработки почвы в среднем за два года формирование лучшей урожайности кукурузы обеспечило дискование – 4,75 т/га, при проведении которого содержание в пахотном слое почвы подвижного фосфора составило 21 мг/кг, или 63 кг/га. При вспашке и чизелевании урожайность была ниже соответственно на 1,10 и 0,40 т/га, содержание подвижного фосфора – на 6 мг/кг (18 кг/га) и 5 мг/кг (15 кг/га) (табл. 1).

При использовании средств химизации и биологизации в среднем за 2 года наибольшая урожайность кукурузы отмечена в варианте с использованием биопрепарата V417 на фоне дискования – 5,10 т/га, при содержании подвижного фосфора в пахотном слое почвы 21 мг/кг (63 кг/га). Это было выше, чем в лучших вариантах с внесением минеральных удобрений и их совместным применением с биопрепаратом V417 при дисковании и чизелевании, соответственно на 0,50 т/га и 0,40 т/га, при содержании подвижного фосфора в обоих вариантах – 19 мг/кг (57 кг/га). Самое высокое в среднем за 2 года содержание подвижного фосфора в почве (26 мг/кг, 78 кг/га)

**Табл. 1. Урожайность кукурузы на зерно и содержание подвижного фосфора в пахотном слое почвы в начале (I) и конце (II) вегетационного периода в зависимости от приемов основной обработки, удобрений и биопрепарата**

Прием обработки почвы (фактор А)	Удобрения и биопрепарат (фактор В)	Урожайность кукурузы на зерно, т/га			Содержание P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> в слое почвы 0...25 см, мг/кг, кг/га					
		2021 г.	2022 г.	средняя	2021 г.		2022 г.		среднее	
					I	II	I	II	мг/кг	кг/га
Вспашка	0*	2,53	3,29	2,91	13	8	15	12	12	36
	N <sub>120</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	2,44	3,91	3,17	17	11	18	14	15	45
	V417	3,12	4,67	3,89	17	11	19	14	15	45
	N <sub>120</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub> + V417	2,30	5,49	3,89	16	13	20	14	16	48
	среднее	2,62	4,69	3,65	17	12	19	14	15	45
Дискование	0	3,31	3,62	3,46	15	10	20	14	15	45
	N <sub>120</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	3,57	5,64	4,60	20	13	23	18	19	57
	V417	4,13	6,07	5,10	17	18	27	22	21	63
	N <sub>120</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub> + V417	2,35	6,78	4,56	24	22	30	27	26	78
	среднее	3,35	6,16	4,75	20	18	27	22	21	63
Чизелевание	0	2,79	3,41	3,10	13	8	16	13	12	36
	N <sub>120</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	3,46	4,68	4,07	16	12	19	16	16	48
	V417	2,79	5,82	4,30	14	10	17	14	14	42
	N <sub>120</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub> + V417	3,21	6,20	4,70	21	14	26	15	19	57
	среднее	3,15	5,56	4,35	17	12	21	15	16	48
Среднее	0	2,88	3,44	3,16	14	9	17	13	13	39
	N <sub>120</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	3,16	4,74	3,95	18	12	20	16	17	51
	V417	3,35	5,52	4,43	16	13	21	17	17	51
	N <sub>120</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub> + V417	2,62	6,16	4,39	20	16	25	19	20	60
	среднее	3,04	5,47	4,25	18	14	22	17	17	51
НСР <sub>05</sub>	0,30	0,33	0,31	1,0	0,9	1,2	1,1	1,0	3	
НСР <sub>05</sub> А	0,21	0,25	0,23	0,7	0,6	0,9	0,8	0,7	3	
НСР <sub>05</sub> В	0,20	0,22	0,21	0,5	0,4	0,8	0,7	0,7	2	
НСР <sub>05</sub> АВ	0,12	0,14	0,13	0,4	0,3	0,5	0,5	0,5	2	

\*без удобрений и биопрепарата

**Табл. 2. Баланс фосфора в пахотном слое почвы при разных приемах основной обработки с применением минеральных удобрений и биопрепарата по последствию сидерата (среднее за 2021–2022 гг.), кг/га**

Прием обработки почвы (фактор А)	Удобрения и биопрепарат (фактор В)	Вынос фосфора с урожаем	Поступление фосфора			Баланс	Интенсивность баланса, %
			с семенами и осадками	с минеральными удобрениями	с сидератом		
Вспашка	0	25	7	-	-	-18	28
	N <sub>120</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	37	7	60	28	58	256
	V417	41	7	-	36	2	104
Дискование	N <sub>120</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub> + V417	42	7	60	30	55	230
	0	29	7	-	-	-22	24
	N <sub>120</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	47	7	60	32	52	210
Чизелевание	V417	41	7	-	40	6	114
	N <sub>120</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub> + V417	44	7	60	37	60	236
	0	28	7	-	-	-21	25
	N <sub>120</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	45	7	60	31	53	217
	V417	42	7	-	36	1	102
	N <sub>120</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub> + V417	48	7	60	32	51	206

отмечено при дисковании с совместным применением удобрений и биопрепарата V417 (см. табл. 1).

Баланс элементов питания служит важной составной частью системы применения удобрений. В наших исследованиях среднегодовое поступление фосфора с минеральными удобрениями составило 60 кг/га, с сидератом – 28...40 кг/га, с семенами и атмосферными осадками – 7 кг/га. Среднегодовой вынос фосфора урожаем кукурузы и побочной продукцией в вариантах с обработками почвы без использования удобрений при вспашке, дисковании и чизелевании составлял соответственно 25, 29 и 28 кг/га, баланс фосфора – -18, -22 и -21 кг/га, интенсивность баланса – 28, 24 и 25% (табл. 2).

Применение средств химизации и биологизации способствовало увеличению выноса фосфора и росту урожайности кукурузы, при этом баланс его становился положительным. Самый высокий среднегодовой баланс фосфора в почве 60 кг/га при интенсивности 236 % обеспечивало совместное использование минеральных удобрений и биопрепарата по последствию сидерата на фоне дискования. При вспашке и чизелевании лучшие показатели отмечены в вариантах с применением минеральных удобрений по последствию сидерата. Баланс фосфора при вспашке составил 58 кг/га с самой высокой интенсивностью 256 %, а при чизелевании величины этих показателей были равны соответственно 53 кг/га и 217 % (см. табл. 2).

**Выводы.** В среднем за 2 года формированию самой высокой урожайности кукурузы на зерно среди приемов основной обработки почвы способствовало дискование – 4,75 т/га. Такие результаты были достигнуты при наибольшем содержании в пахотном слое почвы подвижного фосфора – 21 мг/кг (63 кг/ га). На этом фоне была отмечена и самая высокая урожайность при использовании средств химизации и биологизации – 5,10 т/га в варианте с применением биопрепарата V417. В среднем за два года наибольшие содержание подвижного фосфора – 26 мг/кг (78 кг/ га) и его баланс – 60 кг/га (с интенсивностью 236%) достигнуты при дисковании в комплексе с совместным применением удобрений и биопрепарата V417 по последствию сидерата (рапса ярового). При этом обеспеченность почвы подвижным фосфором возрастала с низкой (11...15 мг/кг) в контроле до средней (16...30 мг/кг) в вариантах с удобрениями и биопрепаратом по отдельности и в сочетании, что способствовало повышению урожайности культуры.

### Литература

1. Тютюнов С.И. Комплексная оценка влияния многолетнего применения удобрений на основные показатели плодородия чернозема типичного // *Плодородие*. 2021. № 3. С. 45–48.
2. Конова А.М., Гаврилова А.Ю. Действие и последствие длительного внесения минеральных удобрений на продуктивность севооборота и агрохимические показатели почвы // *Плодородие*. 2021. № 4. С. 10–13.
3. Aliyev I.H., Aliyev Z.H. On evaluating the effect of soil treatment and fertilizer on the cultivation of grain crops // *Natural resources of the Earth and environmental protection*. 2020. Т. 1. No. 3. P. 4–8.
4. Власова О. И., Смакуев А. Д., Трубочева Л. В. Влияние приемов основной обработки почвы при возделывании гибридов кукурузы в условиях Карачаево-Черкесской Республики // *Земледелие*. 2019. № 7. С. 32–34.
5. Аверкина С.С. Региональные особенности и оценка методов определения подвижных фосфатов в почвах Новосибирской области // *Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет)*. 2019. № 3 (52). С. 7–16.
6. Динамика содержания подвижного фосфора в зависимости от системы удобрения и предшественников при освоении залежных земель / В.А. Шевченко, А.М. Соловьев, Г.И. Бондарева и др. // *Плодородие*. 2020. № 5. С. 3–6.
7. Чекмарёв П.А., Лукин С.В. Мониторинг содержания подвижных форм фосфора и калия в пахотных почвах Белгородской области // *Достижения науки и техники АПК*. 2020. Т. 34. № 2. С. 5–9.
8. Влияние длительного применения удобрений на показатели плодородия дерново-подзолистой почвы в зернотравяном севообороте / Р.Ф. Байбеков, Н.А. Киричников, С.П. Бижан и др. // *Земледелие*. 2021. № 7. С. 12–15.
9. Влияние систем удобрения на плодородие чернозема типичного и урожайность озимой пшеницы / А.Х. Куликова, Е.С. Волкова, Е.А. Яшин и др. // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2022. № 4 (60). С. 32–37.
10. Влияние многолетнего внесения удобрений на продуктивность звена севооборота и агрохимические свойства чернозема выщелоченного / А.Н. Кожокина, Н.Г. Мязин, Т. Сальгадо Пачеко и др. // *Земледелие*. 2022. № 6. С. 11–15.

11. Минеев В.Г. Воспроизводство плодородия почвы и экологические функции удобрений в агроценозе // Проблемы агрохимии и экологии. 2008. № 1. С. 3–6.
12. Кузин Е.Н., Арефьев А.Н., Кузина Е.Е. Изменение продуктивности и качества растениеводческой продукции под влиянием элементов биологического земледелия // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 3 (55). С. 40–45.
13. Лукин С.В. Влияние биологизации земледелия на плодородие почв и продуктивность агроценозов (на примере Белгородской области) // Земледелие. 2021. № 1. С. 11–15.
14. Новоселов С.И., Толмачев Н.И., Еремеев Р.В. Влияние подсевного сидерата на урожайность озимой ржи // Плодородие. 2018. № 6. С. 50–52.
15. Котова Е.О. Эффективность применения сидератов как приема фитомелиорации серых лесных почв Орловской области // Вестник аграрной науки. 2020. № 2 (83). С. 158–159.
16. Влияние сидератов на урожайность яровых зерновых культур в условиях орошения Терско-Сулакской подпровинции / А.А. Айтмиров, М.Б. Халилов, Т.Т. Бабаев и др. // Юг России: экология, развитие. 2018. Т. 13. № 2. С. 144–155.
17. Эффективные безопасные приемы повышения урожайности кукурузы на зерно / В.Н. Наумкин, Л.А. Наумкина, А.М. Хлопяников и др. // Зернобобовые и крупяные культуры. 2017. № 3. С. 81–87.
18. Pelech L. Formation of productivity of winter wheat crops depending on agrotechnical methods of tillage // The Scientific Heritage. 2021. No. 62–1 (62). P. 5–8.
19. Влияние стимуляторов роста на урожайность и качество кукурузы на зерно в условиях Предгорной под провинции Республики Дагестан / Ш.М. Хаидахилова, М.Р. Мусаев, М.Б. Халилов и др. // Вестник РУДН. Серия: Агрономия и животноводство. 2021. Т. 16. № 1. С. 54–65.
20. Нерсесян С.М., Дубовский И.М., Коробова Л.Н. Влияние микробного препарата БакСиб на озимый ячмень и состояние чернозема южного // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2022. № 3 (64). С. 55–66.
21. Продуктивность сельскохозяйственных культур при применении биопрепаратов на основе ризосферных бактерий (PGPR) / Л.З. Каримова, Л.С. Нижегородцева, В.А. Колесар и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2019. Т. 14. № S4-1 (55). С. 52–58.
22. Брескина Г.М., Чуян Н.А., Панкова Т.И. Действие биопрепаратов на рост и развитие сельскохозяйственных культур // Земледелие. 2021. № 3. С. 27–30.

Поступила в редакцию 19.01.2023

После доработки 18.02.2023

Принята к публикации 15.03.2023

**ДЕЙСТВИЕ ПРЕПОСЕВНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАЗВИТИЕ ПРОРОСТКОВ ЯЧМЕНЯ И АКТИВНОСТЬ ФЕРМЕНТОВ И ФИТОГОРМОНОВ**

**Н.Н. Лой**, кандидат биологических наук, **Н.И. Санжарова**, член-корреспондент РАН,  
**Е.А. Казакова**, кандидат биологических наук, **С.В. Битаршвили**, кандидат биологических наук

*Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии,  
249032, Калужская обл., Обнинск, Киевское шоссе, 109 км  
E-mail: loy.nad@yandex.ru*

*Исследования проводили с целью определения возможности предпосевной обработки семян ячменя низкоэнергетическим электронным излучением для улучшения ростовых процессов и снижения поражения фитопатогенами. В лабораторном эксперименте изучали воздействие низкоэнергетического (160 кэВ) электронного излучения в дозах 1, 3 и 5 кГр при мощности дозы 500 Гр/имп. на посевные качества, морфометрические показатели проростков, пораженность грибными болезнями на естественном инфекционном фоне, а также на активность ферментов и концентрацию фитогормонов в 7-и суточных проростках. В контроле семена не облучали. Обработка дозой 3 кГр вызвала статистически значимое увеличение, по сравнению с контролем, лабораторной всхожести на 6 % и силы роста семян – на 10 %. Облучение в дозах 1 и 5 кГр не оказало влияния на величины этих показателей. В вариантах с дозой 1 и 5 кГр происходило увеличение длины ростка, по сравнению с контролем, на 6,8...8,2 %, корешка – на 5,9...24,6 %. Доза 3 кГр не влияла на величины этих показателей. Облучение не оказало значительного воздействия на сырую и сухую массу проростков и содержание в них воды. Обработка семян электронным излучением полностью подавляла развитие *Penicillium* spp. при дозах 1, 3 и 5 кГр, *Fusarium* spp. – при дозах 3 и 5 кГр, но значительно увеличивало пораженность проростков *Bipolaris sorokiniana* в 2,1 раза и ее распространенность в 1,8 раза при дозе 5 кГр. Облучение не оказало влияния на активность большинства ферментов и фитогормонов в проростках, кроме повышения содержания ИУК в 1,5 раза при дозе 5 кГр и ИМК в 2,7 раза при дозе 1 кГр, по сравнению с контролем.*

**THE EFFECT OF PRE-SOWING ELECTRON RADIATION ON THE DEVELOPMENT OF BARLEY SEEDLINGS AND THE ACTIVITY OF ENZYMES AND PHYTOHORMONES**

**N.N. Loy, N.I. Sanzharova, E.A. Kazakova, S.V. Bitarishvili**

*Russian Institute of Radiology and Agroecology,  
249032, Kaluzhskaya obl., Obninsk, Kievskoe shosse, 109 km*

*In a laboratory experiment, the effect of pre-sowing low-energy (160 keV) electron radiation at doses of 1, 3, and 5 kGy at a dose rate of 500 Gy/pulse was studied. on sowing qualities, morphometric parameters of barley seedlings of the Vladimir spring variety, their susceptibility to fungal diseases against a natural infectious background, as well as on the activity of enzymes and the concentration of phytohormones in 7-day-old seedlings. The repetition in the experiment was 3-fold, non-irradiated seeds served as control. Irradiation of seeds at a dose of 3 kGy caused a statistically significant increase in comparison with the control of laboratory germination (LV) by 6 % and seed growth force (SPC) by 10 %, and at a dose of 1 kGy, an increase in root length by 24.6 % and had no significant effect on morphometric parameters at a dose of 5 kGy. Seed treatment did not affect the green and dry weight of the seedlings and the percentage of water content in them. Irradiation completely suppressed the development of *Penicillium* spp. at doses of 1, 3 and 5 kGy, *Fusarium* spp. – at doses of 3 and 5 kGy and significantly increased the prevalence of *Bipolaris sorokiniana* seedlings by 2.1 times and its prevalence by 1.8 times at a dose of 5 kGy. Electron irradiation of barley seeds had no effect on the activity of enzymes and phytohormones, except for a significant increase in 7-day-old seedlings of the content of IAA at a dose of 5 kGy by 1.5 times and IBA at a dose of 1 kGy by 2.7 times compared with the control.*

**Ключевые слова:** ячмень яровой (*Hordeum vulgare* L.), электронное излучение, морфометрические показатели, пораженность болезнями, активность ферментов, концентрация фитогормонов

**Key words:** electronic radiation, spring barley *Hordeum vulgare* L., morphometric indicators, disease incidence, enzyme activity, phytohormone concentration

Усилия многих ученых и специалистов направлены на изыскание новых методов обеззараживания семян без применения ядохимикатов. К их числу можно отнести развитие принципиально нового метода предпосевной подготовки семян, основанного на использовании энергии электромагнитных излучений [1, 2, 3]. Его использование открывает возможности для решения важных агроэкологических и социально-экономических проблем, направленных на дальнейшее увеличение производства продукции растениеводства [4, 5, 6].

В экстремальных условиях важнейший механизм устойчивости – активизация многоуровневой биохимической системы антиоксидантной защиты, в которую входит большое число компонентов. Среди них особое место занимают низкомолекулярные метаболиты, проявляющие антиоксидантные свойства (аскорбиновая кислота, глутатион, пролин, каротиноиды, флавоноиды

и др.), и антиоксидантные ферменты (СОД, каталаза, пероксидаза) [7, 8].

Цель исследований – изучение возможности предпосевной обработки семян ячменя низкоэнергетическим электронным излучением для улучшения ростовых процессов и снижения поражения фитопатогенами.

**Методика.** Эксперименты проводили на яровом ячмене (*Hordeum vulgare* L.) сорта Владимир урожая 2018 г. (репродукция элита). В процессе хранения всхожесть семян снизилась, что позволило полнее оценить влияние предпосевного облучения на их посевные качества. Схема опыта предусматривала облучение семян перед посевом на электронном ускорителе «Дуэт» [9] в дозах 1, 3 и 5 кГр. Мощность дозы излучения составляла 500 Гр/имп., энергия электронов – 160 кэВ. Контролем служили необработанные семена. Время экспозиции зависело от заданной дозы и энергии импульса, то есть



она набиралась количеством импульсов.

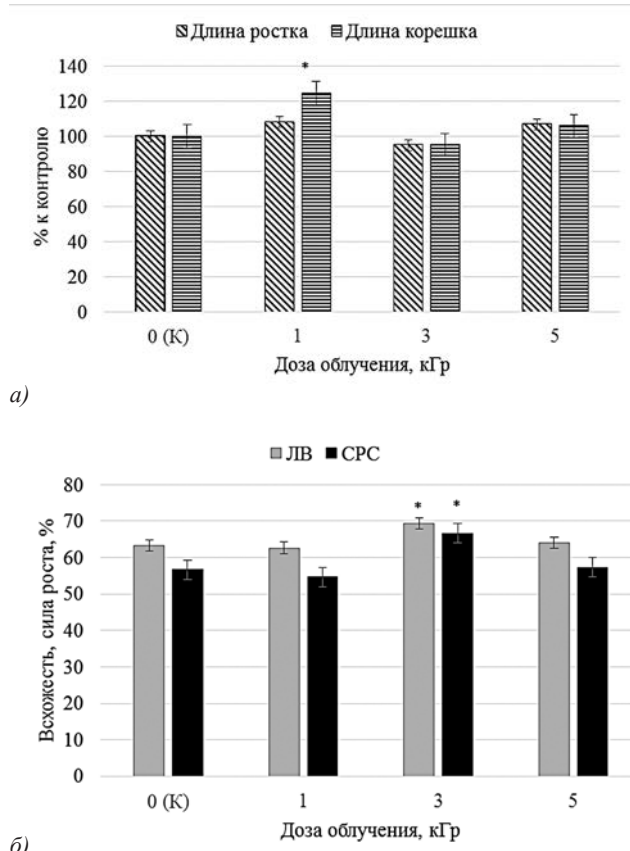
Через 5 дней после облучения семена проращивали в рулонах фильтровальной бумаги в течение 7 суток в термостате при температуре +20 °С согласно ГОСТ 12038-84. При проведении лабораторных опытов учитывали лабораторную всхожесть (ЛВ), длину ростка и корешка, сырую и сухую массу проростков, содержание воды в проростках. Учет пораженности (степень поражения и распространенность) проростков болезнями проводили по ГОСТ 12044-93.

Для анализа активности ферментов с рулонов фильтровальной бумаги отбирали семидневные проростки ячменя в трех биологических повторностях на каждую исследуемую дозу (одна повторность – 4...5 растений с одного рулона). Образцы сразу же замораживали в жидком азоте и хранили в сосуде Дьюара до начала анализа. Для исследования из каждой криопробирки отбирали навеску ткани (~ 0,26 г) и гомогенизировали в фарфоровой ступке в жидком азоте. Гомогенат быстро (избегая размораживания) переносили в чистые пробирки и растворяли в 1 мл 0,05 М холодного калий-фосфатного буфера (рН 7,0). Затем содержимое пробирок перемешивали на вортексе, после чего гомогенат центрифугировали в течение 20 мин. при скорости 14500 об./мин. на мини-центрифуге «Eppendorf» с охлаждением. Полученный супернатант использовали для анализа. Пробоподготовку проводили с использованием штатива-охладителя «CoolBox». Активность ферментов каталазы и гваяколовой пероксидазы определяли по методике [10], аскорбатпероксидазы – по методике [11] с незначительными модификациями, связанными с подготовкой реакционных смесей для анализа на бескуветном спектрофотометре. Экстракты анализировали на бескуветном спектрофотометре «NanoDrop-2000» (Thermo, США).

Концентрацию фитогормонов – индолилуксусной кислоты (ИУК), индолилмасляной кислоты (ИМК) и абсцизовой кислоты (АБК) – оценивали в образцах листьев методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). Навеску растительного материала массой 300 мг гомогенизировали в жидком азоте, пробоподготовку образцов проводили согласно методике, ранее апробированной на проростках ячменя [12]. Качественный и количественный анализ целевых компонентов осуществляли на высокоэффективном жидкостном хроматографе Shimadzu LC-30 Nexera (Япония) с диодно-матричным детектором SPD-M20A (Shimadzu). Разделение фитогормонов проводили на аналитической колонке с обращенной фазой C18 (Shim-pack XRODSII, 2 мкм, диаметр 3,0 мм, длина 100 мм, Shimadzu). Данные обрабатывали с помощью программного обеспечения Lab Solutions (Shimadzu). Анализ проводили в 3 биологических повторностях с двумя техническими репликациями.

Экспериментальные данные анализировали методами непараметрической статистики с использованием программ MS Excel и STATISTICA. Статистическую значимость различий оценивали с помощью U-критерия Манна-Уитни.

**Результаты и обсуждение.** Оценка механизма влияния ионизирующего излучения на растения возможна путем определения изменения многих факторов, в том числе морфометрических показателей развития растений [13]. Результаты анализа 7-и суточных проростков ячменя свидетельствуют о том, что облучение семян в дозе 1 и 5 кГр способствует увеличению длины ростка, по сравнению с контролем, на 6,8 ... 8,2 %, корешка – на 5,9...24,6 %. Обработка дозой 3 кГр не оказывала влия-



**Рис. 1.** Влияние облучения на морфометрические показатели проростков (а) и лабораторную всхожесть и силу роста семян (б),

\* различия статистически значимы, по сравнению с контролем, при  $p \leq 0,05$ .

ния на величины этих показателей (рис. 1а). Нелинейный характер зависимости между интенсивностью облучения семян и откликом растений и патогенов отмечали и ранее на семенах огурца [14] и яровой пшеницы [15].

Предпосевное электронное облучение семян в дозе 3 кГр вызвало увеличение лабораторной всхожести (ЛВ), по сравнению с контролем, на 6 %, силы роста семян (СРС) – на 10 %, но не оказало достоверного влияния на величины этих показателей в вариантах с дозами 1 и 5 кГр (рис. 1б). Стимулирующее действие облучения в дозе 3 кГр на посевные качества семян ячменя при отсутствии значимого эффекта на морфометрические параметры позволяют предположить различные механизмы воздействия облучения на разные показатели развития семян ячменя. Подобные результаты были получены исследователями в других работах [14, 15].

Облучение не оказало статистически значимого влияния на сырую и сухую массу проростков, а также содержание воды в проростках. Сырая масса в расчете на 1 растение варьировала в пределах 0,30... 0,34 г, сухая – в пределах 0,030... 0,035 г.

Результаты фитоэкспертизы 7-и суточных проростков свидетельствуют о их пораженности возбудителями грибных болезней *Bipolaris sorokiniana* Sh., *Fusarium* spp. и *Penicillium* spp. (рис. 2). В наибольшей степени они были поражены *Bipolaris sorokiniana*. Предпосевное облучение в дозе 5 кГр статистически значимо увеличивало пораженность проростков этим возбудителем – в 2,1 раза, распространенность болезни – 1,8 раза, а в дозах 1 и 3 кГр не оказывало значительного влияния на



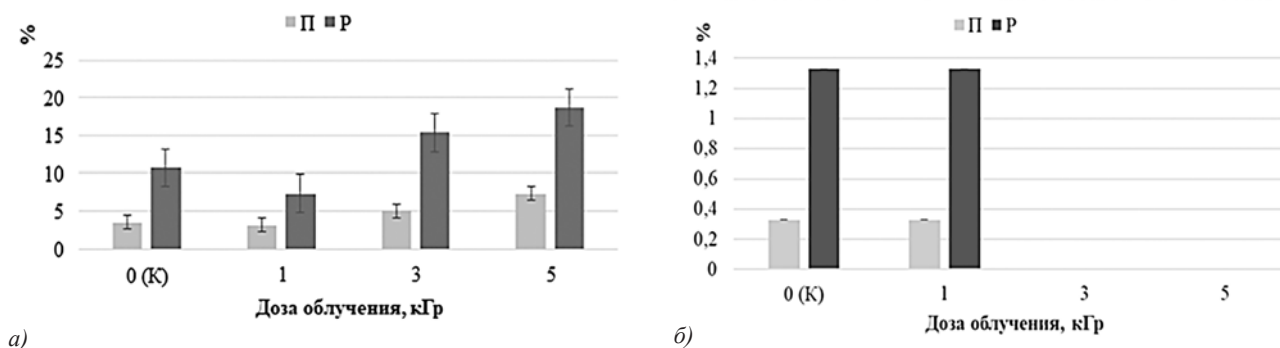


Рис. 2. Влияние облучения на пораженность проростков ячменя *Bipolaris sorokiniana* (а) и *Fusarium spp.* (б): П – пораженность, Р – распространность.

величины этих показателей. Развитие *Fusarium spp.* и *Penicillium spp.* в контроле отмечали на достаточно низком уровне – 0,33 %. Облучение в дозах 1...5 кГр полностью подавило развитие *Penicillium spp.*, в дозах 3 и 5 кГр – *Fusarium spp.* (рис. 2б). В наших исследованиях на огурце [14] было установлено, что эффективность предпосевного облучения семян по степени снижения пораженности проростков грибными болезнями была разнонаправленной и зависела от таких факторов, как сортовые особенности культуры, режим облучения, доза и продолжительность пострадиационного периода.

Естественный инфекционный фон в эксперименте в контроле был достаточно высоким, однако позволил выявить эффективность применения предпосевного электронного облучения семян на радиочувствительность различных патогенов.

Контроль уровня активных форм кислорода и продуктов перекисного окисления липидов, которые могут возникать в результате воздействия на растения различных стрессоров, в том числе облучения проростков, осуществляется антиоксидантной системой растений. К числу основных ферментативных антиоксидантов относятся каталаза, гваяколовая пероксидаза и аскорбатпероксидаза [16]. Изучение их работы поможет выяснить, как отвечает антиоксидантная система растений на электронное излучение в исследуемых дозах. В нашем исследовании предпосевное облучение семян ячменя сорта Владимир не оказывало статистически значимого влияния на активность каталазы, аскорбатпероксидазы и содержание гваяколовой пероксидазы, по сравнению с контролем (см. табл.).

В других исследованиях [17] было установлено, что облучение электронным пучком 0,5 кГр в целом может увеличивать активность пероксидазы, каталазы и аскорбатпероксидазы в плодах киви в течение периода

хранения плодов. Облучение зрелых плодов перца ускоренными электронами в диапазоне доз 1...7 кГр [18] не изменяло или снижало активность ферментов каталазы, аскорбатпероксидазы и супероксиддисмутазы, по сравнению с необлученными плодами, а активность пероксидазы увеличивалась по мере роста дозы. Возможно, дозы низкоэнергетичного электронного излучения, используемые в нашей работе недостаточны, для того чтобы вызвать активацию или угнетение изучаемых ферментов.

**Активность каталазы, гваяколовой пероксидазы и аскорбатпероксидазы в контрольных и облученных проростках ячменя, МЕ\* в мл реакционной смеси**

Доза	Каталаза САТ	Гваяколовая пероксидаза РОХ	Аскорбатпероксидаза АРХ
0 (контроль)	230,849	0,150	2,943
1 кГр	201,835	0,060	3,127
3 кГр	208,142	0,128	2,943
5 кГр	208,142	0,372	3,127

\*МЕ – международные единицы ферментативной активности.

Регуляция роста растений в условиях действия факторов различной природы, в том числе физических, опосредована работой гормональной системы [19]. Фитогормоны, вырабатываясь в очень низких концентрациях и транспортируясь по всему растению, координируют различные пути передачи сигналов и реализацию физиологических программ развития [20]. Изменение фитогормонального статуса – своего рода индикатор

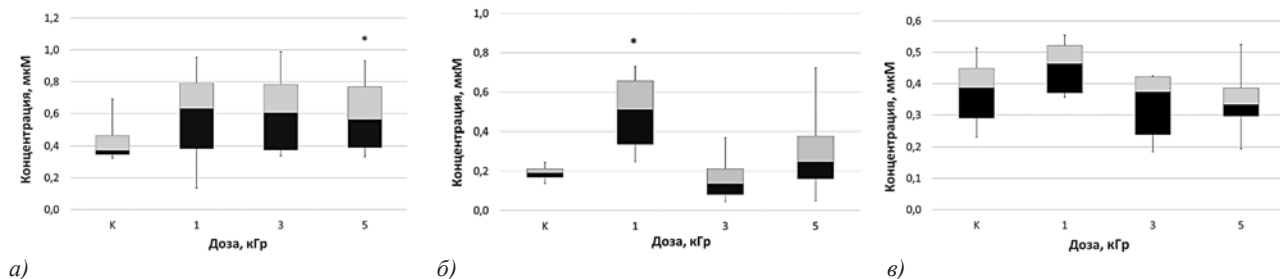


Рис. 3. Содержание ИУК (а), ИМК (б) и АБК (в) в 7-и дневных побегах ячменя (данные представлены в формате первый квартиль – Q1, медиана – Q2, третий квартиль – Q3; серым цветом обозначен блок, высота которого равна разности между Q3 и Q2, черным – между Q2 и Q1; высота серо-черного блока равна интерквартильному размаху – разности между Q3 и Q1),

\*различия статистически значимы, по сравнению с контролем, по результатам U-теста.

функционального состояния растений, определяющего его ростовые стратегии. Облучение семян в дозе 5 кГр привело к статистически значимому ( $p=0,05$ ) повышению ИУК в 7-и суточных проростках в 1,5 раза (рис. 3а), при дозах 1 и 3 кГр отмечали рост величины этого показателя на уровне тенденции ( $p=0,10$ ). Предпосевное электронное облучение семян ячменя дозой 1 кГр вызвало статистически значимое ( $p=0,01$ ) увеличение содержания ИМК, по сравнению с необработанными растениями, в 2,7 раза и не оказало влияния при более высоких дозах 3 и 5 кГр (рис. 3б). Определение концентрации АБК, природного гормонального ингибитора роста терпеноидной природы, показало, что электронное облучение семян не влияло на величину этого показателя (рис. 3в).

**Выводы.** Низкоэнергетическое электронное облучение семян ячменя перед посевом – эффективный прием, использование которого в дозе 3 кГр повышает посевные качества семян (всхожесть на 6 % и силу роста на 10 %), в дозе 1 кГр вызывает увеличение длины корешка на 24,6 %, в дозах 3 и 5 кГр способствует снижению пораженности проростков фитопатогенами *Penicillium* spp. и *Fusarium* spp. Необходимо провести дальнейшие исследования в более широком диапазоне доз с целью выявления наиболее эффективного варианта.

#### Литература.

1. Влияние электромагнитного поля низкой частоты на активность роста поверхностной микрофлоры яблоч / М. Г. Барышев, Н. Н. Волченко, Е. Е. Текущая и др. // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2022. № 1. С. 77–82.
2. Винецкий Е. И., Чернов А. В. Влияние различных режимов обработки листьев табака с градиентным воздействием постоянного магнитного поля на их химический состав // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2022. № 2-3. С. 58–62.
3. Санжарова Н. И., Лой Н. Н. Эффективность и перспективы применения ионизирующего излучения для фитосанитарной обработки зерна и зернопродуктов // *Пищевая промышленность*. 2022. № 5. С. 10–13. doi : 10.52653/PPI.2022.5.5.002.
4. Шорсткий И. А., Худяков Д. А. Влияние электрофизической обработки на структуру масляных материалов с применением X-ray микротомографии // *Вестник ВГУИТ*. 2018. Т. 8. №3. С. 116–123. doi : 10.20914/2310-1202-2018-3-116-123.
5. Resistance of different species of insect pests of grain to the influence of gamma radiation / N. N. Loi, N. I. Sanzharova, T. V. Chizh, et al. // *AIP Conference Proceedings*. 2022. Vol. 2478. Article. 050018. URL : <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0099264> (дата обращения : 09.03.2023) doi : 10.1063/5.0099264.
6. Облучение биологических объектов с применением ионизационного пучка с целью ингибирования условно-патогенной и патогенной микрофлоры сельскохозяйственного сырья / М. А. Завьялов, В. А. Кухто, Н. В. Илюхина и др. // *Вестник ВГУИТ*. 2018. Т. 8. №3. С. 278–283. doi : 10.20914/2310-1202-2018-3-278-282.
7. Системная защита риса от пирикулярриоза ингибиторами антиокислительных ферментов / А. А. Аверьянов, Т. Д. Пасечник, В. П. Лапикова и др. // *Физиология растений*. 2015. Т. 62. № 5. С. 628–637.
8. Влияние дефицита криптохромов 1 и 2 на фотосинтетическую активность и про-антиоксидантный баланс в листьях растений *Arabidopsis thaliana* при действии УФ-В / А. Ю. Худякова, В. Д. Креславский, А. Н. Шмарев и др. // *Физиология растений*. 2022. Т. 69. № 2. С. 207–215.
9. Vorobyov M. S., Koval N. N., Sulakshin S. A. An electron source with a multiaperture plasma emitter and beam extraction into the atmosphere // *Instrum. Exp. Tech*. 2015. 58. No. 5. P. 687–695.
10. Chance B., Maehly A. C. Assay of catalases and peroxidases // *Methods Enzymol*. 1955. Vol. 2. P. 764–775.
11. Verma S., Dubey R. S. Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants // *Plant Science*. 2003. Vol. 164. P. 645–655.
12. Битаршвили С. В., Волкова П. Ю., Гераськин С. А. Влияние  $\gamma$ -облучения семян на фитогормональный статус проростков ячменя // *Физиология растений*. 2018. Т. 65. № 2. С. 223–231.
13. Ульяненко Л. Н., Удалова Л. Н. Оценка состояния окружающей среды по реакции сельскохозяйственных растений на действие ионизирующих излучений // *Радиация и риск*. 2015. Т. 24. № 1. С. 118–131.
14. Влияние электронного излучения на радиорезистентность фитопатогенной микрофлоры огурца / Н. Н. Лой, Н. И. Санжарова, С. Н. Гулина и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2021. № 4. С. 47–50. doi : 10.31857/S2500262721040104.
15. Предпосевная обработка семян яровой пшеницы импульсным электронным пучком в атмосфере / С. Ю. Дорошкевич, К. П. Артёмов, Н. Н. Терещенко и др. // *Химия высоких энергий*. 2021. Т. 55. № 4. С. 326–332.
16. Прадедова Е. В., Ишеева О. Д., Салеев Р. К. Классификация системы антиоксидантной защиты как основа рациональной организации экспериментального исследования окислительного стресса у растений // *Физиология растений*. 2011. Т. 58. № 2. С. 177–185.
17. Electron-beam irradiation delayed the postharvest senescence of kiwifruit during cold storage through regulating the reactive oxygen species metabolism / R. Li, S. Yang, D. Wang, et al. // *Radiation Physics and Chemistry*. 2021. Vol. 189. Article. 109717. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969806X21003674?via%3Dihub> (дата обращения : 09.03.2023). doi : 10.1016/j.radphyschem.2021.109717.
18. Electron Beam Ionization Induced Oxidative Enzymatic Activities in Pepper (*Capsicum annum* L.), Associated with Ultrastructure Cellular Damages / Martiane-solano J. R., Nchez-bel Saa P., Egea I., et al. // *J. Agric. Food Chem*. 2005. Vol. 53. P. 8593–8599.
19. Phytohormones and their metabolic engineering for abiotic stress tolerance in crop plants / S.H. Wani, V. Kumar, V. Shriram, et al. // *Crop J*. 2016. – Vol. 4. P. 162–176. doi : 10.1016/j.cj.2016.01.010.
20. Генетика развития растений / Л. А. Лутова, Т. А. Ежова, И. Е. Додуева и др. СПб. : Наука, 2010. 539 с.

Поступила в редакцию 06.02.2023  
 После доработки 05.03.2023  
 Принята к публикации 19.03.2023

## ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ФОРМИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ КАРТОФЕЛЯ В УСЛОВИЯХ НЕДОСТАТОЧНОГО УВЛАЖНЕНИЯ

А.Л. Бакунов, кандидат сельскохозяйственных наук, Н.Н. Дмитриева, научный сотрудник,  
С.Л. Рубцов, кандидат сельскохозяйственных наук, А.В. Милехин, кандидат сельскохозяйственных наук

Самарский федеральный исследовательский центр РАН,  
Самарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства им. Н. М. Тулайкова,  
446254, Самарская область, пгт Безенчук, ул. К. Маркса, 41  
E-mail: bac24@yandex.ru

*Исследования проводили с целью выявления сортов и гибридов картофеля различного генетического и географического происхождения, сочетающих высокую урожайность, полевую устойчивость к мозаичным вирусам и адаптивность к стрессовым абиотическим факторам среды, оптимизации и повышения эффективности полевой оценки сортов картофеля. Работу выполняли в 2019–2021 гг. в Самарской области. Вегетационный сезон 2019 г. характеризовался весенней засухой, в 2020–2021 гг. отмечали весенне-летнюю засуху. ГТК был равен 0,45; 0,47 и 0,61 соответственно. В условиях высоких температур и недостаточного увлажнения 36 новых и перспективных сортов картофеля отечественной селекции оценивали по комплексу хозяйственно-ценных признаков. Стандартами в соответствующих группах спелости выступали среднеранний сорт Галя, среднеспелый – Жигулевский, раннеспелый – Удача. Повторность – четырехкратная, по 50 растений в каждой. Почва – чернозём террасовый, обыкновенный, малогумусный, среднемошный, тяжелосуглинистый. В группе среднеранних превзошли стандарт по урожайности сорта Краса Мещеры, Дебют и Сударыня (соответственно на 9,9; 4,8 и 2,8 т/га); среднеспелых – Сиверский и Аляска (на 8,6 и 5,0 т/га), раннеспелых – Терра (на 5,0 т/га). У этих же сортов выявлены высокие показатели полевой устойчивости к наиболее вредоносным в условиях Средневолжского региона вирусам X и Y на уровне 7...9 баллов. Выделены три главных компонента, оказывающие влияние на изменчивость изученных параметров. Для оценочного набора сортов в условиях региона основным лимитирующим фактором урожайности оказалась полевая вирусостойчивость. На долю первой компоненты приходилось 34,6 % варьирования признаков. В нее с максимальными нагрузками входят урожайность (-0,801), устойчивость к вирусам картофеля X (-0,640), S и M (-0,604).*

## FACTORS DETERMINING THE FORMATION OF POTATO YIELD UNDER CONDITIONS OF INSUFFICIENT MOISTURE

Bakunov A. L., Dmitrieva N. N., Rubtsov S. L., Milekhin A. V.

Samara Federal Research Scientific Center RAS,  
Samara Scientific Research Agriculture Institute named after N.M. Tulaykov,  
446254, Samarskaya obl., pgt Bezenchuk, ul. K. Marksa, 41  
E-mail: bac24@yandex.ru

*The purpose of the research is to identify and recommend for production or practical breeding varieties and hybrid potato material of various genetic and geographical origin, combining high yield, field resistance to mosaic viruses and adaptability to stressful abiotic environmental factors, optimize and improve the efficiency of field evaluation of potato varieties. The research was carried out in 2019–2021 in the Bezenchuk district of the Samara region. 2019 was characterized by a spring drought, and in 2020 and 2021 there was a spring-summer drought. The hydrothermal coefficient was 0.45; 0.47 and 0.61, respectively. In conditions of high temperatures and insufficient moisture, 36 new and promising potato varieties of domestic selection were evaluated according to a complex of economically valuable characteristics. The standards were the varieties Arosa, Gala, Zhigulevsky and Udacha. The experimental material was planted in four repetitions. The number of plants in repetition is 50. The predecessor is spring wheat. The soil of the experimental site is terraced chernozem, ordinary, low-humus, medium-thick, heavy loamy. High yields were characterized by medium-early varieties Krasa Meschery, Debut and Sudarinya, which exceeded the Gala standard by 9.9 t/ha, 4.8 t/ha and 2.8 t/ha; medium-ripened Siversky and Alaska (8.6 and 5.0 t/ha higher than the Zhigulevsky standard, respectively), as well as early-maturing Terra variety (5.0 t/ha above the standard Udacha). The same varieties have high indicators of field virus resistance at the level of 7...9 points to the most harmful X and Y viruses in the conditions of the Middle Volga region. Three main components that have the most significant impact on the variability of the studied parameters are identified. It is shown that field virus resistance was the main limiting factor of yield for the studied set of varieties under conditions of elevated air temperatures and insufficient humidification. The share of the first component accounted for 34.6 % of the variation of signs. It includes, with maximum loads of -0.801, -0.640 and -0.604, respectively, the yield and resistance to potato viruses X, S, and M. The productivity of the studied set of potato varieties was to the greatest extent due to field resistance to viruses X, S, M and, to a lesser extent, to virus Y.*

**Ключевые слова:** картофель (*Solanum tuberosum* L.), засухоустойчивость, вирусостойчивость, продуктивность, лимитирующие факторы

**Key words:** : potatoes (*Solanum tuberosum* L.), drought resistance, virus resistance, productivity, limiting factors

Повышенная температура воздуха и дефицит осадков – основные лимитирующие факторы, которые отрицательно сказываются на урожайности картофеля. Процесс постепенного изменения климата в сторону потепления приводит к тому, что такие условия все чаще отмечают в период вегетации картофеля во всех регионах России [1]. Картофель – культура умеренного климата, оптимальная температура воздуха для развития его надземной части составляет 18...25 °С, а оптимальная температура

почвы для роста клубней – 17...19 °С [2]. Это одна из наиболее чувствительных к дефициту влаги и высокой температуре воздуха сельскохозяйственная культура [3].

Влагообеспеченность сильно влияет на рост и развитие растений картофеля в течение практически всего вегетационного периода [4]. При тепловом стрессе и засухе замедляется рост и развитие надземной массы [5], подавляется формирование и развитие клубней [6]. Подобные условия способствуют широкому распростра-



нению фитопатогенных вирусов картофеля, передающихся при вегетативном размножении в последующие поколения, которые способны снижать урожайность культуры до 80 % [7]. Полевая вирусостойчивость выступает одним из основных лимитирующих факторов урожайности картофеля [8, 9].

Эффективное использование потенциала продуктивности картофеля, идентификация и создание сортов, способных формировать полноценный урожай в различных агроклиматических районах, предполагает глубокое понимание эколого-биологических свойств культуры [10]. Сортимент картофеля имеет важнейшее значение в повышении эффективности картофелеводческой отрасли России [11]. Распространение в производстве новых сортов, которые могут эффективно противостоять воздействию неблагоприятных абиотических и биотических факторов среды, позволит полнее удовлетворять потребность населения в качественном картофеле. От правильно подобранных сортов для конкретных почвенно-климатических условий в значительной степени зависят урожайность и качество клубней, их себестоимость и рентабельность производства [12].

Реакции растений на влагообеспеченность определяют их биологические особенности и различные факторы среды [13]. В связи с этим приобретают актуальность изучение реакции сортов картофеля на стрессовое абиотическое и биотическое воздействие, комплексная оценка новых сортов и гибридного материала различного генетического и географического происхождения на жароустойчивость, устойчивость к недостаточному увлажнению, устойчивость к вирусным заболеваниям на жестком естественном фоне.

Цель исследований – выявить сорта и гибридный материал картофеля различного генетического и географического происхождения, сочетающие высокую урожайность, полевую устойчивость к мозаичным вирусам и адаптивность к стрессовым абиотическим факторам среды, оптимизировать и повысить эффективность полевой оценки сортов картофеля.

**Методика.** Работу проводили на опытном поле Самарского научно-исследовательского института сельского хозяйства имени Н. М. Тулайкова (пгт. Безенчук, Самарская область) в 2019–2021 гг. Предшественник – яровая пшеница. Почва опытного участка – чернозём террасовый, обыкновенный, малогумусный, среднеспелый, тяжелосуглинистый со следующей агрохимической характеристикой: рН<sub>KCl</sub> – 6,8 (ГОСТ 26483-85); гидролитическая кислотность – 0,7 мг-экв./100 г почвы (ГОСТ 26212-91); N-NO<sub>3</sub> – 42,9 мг/кг почвы (ГОСТ 26951-86); P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и K<sub>2</sub>O – 166,7 и 115,0 мг/кг почвы соответственно (ГОСТ 26204-91); содержание гумуса – 5,71 % (ГОСТ 26213-91).

Материалом для исследования служили 36 сортов и гибридов отечественной селекции различного генетического и географического происхождения. Стандартами служили сорта Удача (раннеспелый), Ароза (раннеспелый), Гала (среднеранний) и Жигулевский (среднеспелый). Экспериментальный материал высаживали в четырех повторностях по 50 растений в каждой. Посадку и уборку осуществляли механизированно, в 2019 и 2021 гг. – во второй декаде мая, в 2020 г. – в третьей декаде мая. Предпосадочная обработка почвы включала осеннюю зяблевую вспашку, весной – покровное боронование и глубокую культивацию. В ходе вегетации выполняли две междурядные обработки с окучиванием, а также опрыскивание посадок гербицидами (Зенкор-ультра – 1,0 л/га до всходов, Титус – 0,05 кг/га до достижения всходами высоты 20 см), инсектицидами

(Регент – 0,025 кг/га в фазы бутонизации и цветения) и фунгицидами (Танос – 0,6 кг/га, три обработки в фазы бутонизации и цветения). Картофель выращивали без орошения. Уборку осуществляли в первой декаде сентября.

Оценку полевой устойчивости к вирусным и грибным патогенам, учеты продуктивности проводили согласно методическим указаниям по технологии селекционного процесса картофеля [14] и методике исследований по защите картофеля от болезней, вредителей, сорняков и иммунитету [15]. Полевую устойчивость сортов и гибридов картофеля к вирусам Y, X, S, M, а также к альтернариозу оценивали визуально дважды в периоды бутонизации и цветения на естественном инфекционном фоне по следующей шкале: 9 баллов (0...10 % поражённых растений) – очень высокая; 7 баллов (11...25 % поражённых растений) – высокая; 5 баллов (26...50 % поражённых растений) – средняя; 3 балла (50...75 % поражённых растений) – низкая; 1 балл (75...100 %, поражённых растений, гибель растений) – очень низкая. Содержание крахмала в клубнях определяли по методике физиолого-биохимических исследований картофеля [16]. Анализ по шести хозяйственно-ценным признакам (урожайность, полевая устойчивость к Y-вирусу, X-вирусу, комплексу вирусов S и M, альтернариозу и содержанию крахмала в клубнях) проводили методом главных компонент [17].

Метеорологические условия периода вегетации картофеля в 2019 г. отличались неоднородностью. Период всходов, нарастания надземной массы растений и начала цветения характеризовался высокими температурами воздуха и недостаточностью увлажнения. Так, во второй и третьей декаде мая и в июне выпало лишь 11,8 мм осадков при норме 80 мм. Однако в период полного цветения и нарастания массы клубней отмечали снижение температурного режима, средняя температура воздуха в июле и в августе была ниже многолетних на 1,3 и 1,4 °C соответственно. Во второй декаде июля и первой декаде августа выпали обильные осадки (табл. 1).

**Табл. 1. Условия вегетационного периода картофеля в годы проведения исследований**

Месяц	2019 г.	2020 г.	2021 г.	Средние многолетние
<b>Среднемесячная температура, °C</b>				
Май*	17,9	16,9	22,0	14,9
Июнь	20,6	18,3	22,0	19,7
Июль	20,1	23,8	23,2	21,4
Август	17,9	18,5	24,3	19,3
<b>Количество осадков за месяц, мм</b>				
Май*	5,3	3,8	35,1	21
Июнь	6,5	39,2	68,6	59
Июль	62,5	7,9	31,0	56
Август	40,8	29,9	5,0	45
ГТК	0,45	0,47	0,61	
*в 2019 и 2021 гг. приведены данные по 2 и 3 декадам, в 2020 г. – только по 3 декаде.				

Метеоусловия вегетационного периода 2020 г. были крайне неблагоприятными для роста и развития растений картофеля. Так, в июле, в период активного нарастания массы клубней отмечено только 7,9 мм осадков при среднем многолетнем количестве 56 мм. При этом в первой и второй декадах июля осадков не

**Табл. 2. Характеристика сортов картофеля по основным хозяйственно-ценным признакам (среднее за 2019–2021 гг.)**

Сорт	Урожайность, т/га	Устойчивость к вирусным заболеваниям, балл			Устойчивость к альтернариозу, балл	Содержание в клубнях крахмала, %
		X вирус	Y вирус	вирусы S и M		
Барин	14,7	8,7	7,6	8,7	5,7	11,3
Корчма	19,0	9,0	8,2	6,3	7,0	9,8
Купец	19,9	3,7	6,7	9,0	7,7	12,7
Терра	24,7	8,3	7,7	8,2	7,7	14,9
Юбиляр	15,6	7,0	6,8	7,8	6,3	13,3
Варяг	21,0	8,2	7,2	8,7	8,3	12,8
Гранд	18,9	7,3	7,9	7,1	7,7	12,0
Дебют	25,0	8,4	8,7	8,2	7,0	12,3
Краса Мещеры	30,1	9,0	9,0	8,7	6,3	14,6
Красавчик	19,6	8,7	8,5	7,7	6,3	11,2
Кумач	22,2	9,0	8,0	7,0	7,0	10,0
Призер	21,0	8,7	8,2	7,7	5,7	12,8
Садон	20,8	8,8	8,6	8,2	7,0	12,6
Третьяковка	13,5	8,2	8,2	7,7	9,0	12,3
Утро	22,5	8,7	8,8	8,0	7,0	15,4
Эликсред	18,4	8,8	8,7	6,2	8,3	13,5
Калибр	15,0	7,7	6,5	7,3	9,0	12,8
Сердолик	20,1	9,0	6,8	8,8	6,3	14,6
Сударыня	23,0	8,6	7,0	8,8	6,3	12,4
Маринский	9,9	6,0	8,0	5,8	8,3	14,5
Пламя	21,2	9,0	8,3	7,9	8,3	11,9
Северное Сияние	12,8	5,7	8,0	6,0	8,3	14,1
Сигнал	21,8	8,8	7,8	7,3	5,0	12,8
Захар	17,6	8,3	5,7	7,5	8,3	13,5
Сиверский	29,0	9,0	7,8	8,2	6,3	13,0
Аляска	25,4	9,0	8,6	7,4	6,3	15,0
Легенда	22,4	8,7	8,5	7,3	8,3	13,7
Августин	15,6	8,1	8,0	7,0	7,7	10,7
Брусника	14,3	9,0	8,0	8,0	7,7	13,4
Нарымская Ночка	15,1	9,0	6,1	9,0	8,3	12,7
Сокур	10,6	8,0	7,0	6,5	9,0	17,2
Казачок	14,6	8,2	6,7	9,0	7,0	14,2
Янтарь	11,2	9,0	7,1	8,7	7,7	11,7
92-11	19,3	8,0	7,1	6,8	9,0	13,3
6-14-11	14,7	7,7	5,7	6,0	9,0	10,4
4530-5	15,8	7,0	7,5	7,8	9,0	14,3
Удача, St.	19,7	8,0	7,0	8,0	5,0	13,6
Ароза St.	16,7	9,0	9,0	7,2	7,7	12,7
Жигулевский, St.	20,4	9,0	5,4	9,0	5,0	12,1
Гала, St.	20,2	9,7	9,0	8,0	7,7	13,8
НСР <sub>05</sub>	2,3					1,2

было, а температура воздуха за этот месяц составила в среднем 23,8 °С, что выше нормы на 2,4 °С (см. табл. 1). В течение всего вегетационного периода отмечали почвенную засуху.

Метеоусловия вегетационного периода 2021 г. так же были крайне неблагоприятными. В целом за вегетационный период выпало 139,7 мм осадков при норме 181 мм, однако большая его часть характеризовалась почвенной и воздушной засухой. Несмотря на значительное количество осадков в период от посадки до начала цветения, периоды завязывания клубней и нарастания их массы (3 декада июня – август) характеризовались сильным дефицитом влаги. За июль и август выпало 36 мм осадков при среднем многолетнем количестве 101 мм. Среднесуточная температура воздуха в течение

всего вегетационного периода существенно превышала норму (от +1,8 °С в июле до +7,1 °С в мае). Всё это негативно сказалось на урожайности картофеля.

**Результаты и обсуждение.** Максимальной в опыте средней продуктивностью за 2019–2021 гг. характеризовались среднеранние сорта Краса Мещеры, Дебют и Сударыня, превосшедшие стандарт Гала на 9,9; 4,8 и 2,8 т/га соответственно (табл. 2); среднеспелые – Сиверский и Аляска (прибавка к стандарту Жигулевский соответственно 8,6 и 5,0 т/га), раннеспелый – Терра (прибавка к стандарту Удача 5,0 т/га). При этом, как было установлено ранее, почти все перечисленные высокоурожайные сорта, относятся к интенсивному типу, исключение составлял Краса Мещеры [18].

Кроме того, выделенные сорта характеризовались



высокими показателями полевой устойчивости к наиболее вредоносным в условиях Средневолжского регионе вирусным патогенам. Так, у сорта Краса Мещеры за все годы исследований не наблюдали визуальных симптомов заболеваний, вызываемых вирусами X и Y, его полевая устойчивость к этим возбудителям находилась на уровне 9 баллов. У сортов Сиверский и Аляска отмечали только отдельные незначительные симптомы поражения вирусом Y (полевая вирусоустойчивость к YBK 7,8 и 8,6 балла соответственно). При этом все сорта с высокой продуктивностью характеризовались только средней полевой устойчивостью к альтернариозу – от 6,3 до 7,0 баллов. Высокую устойчивость к этому заболеванию на уровне 9 баллов отмечали у сортов и гибридов с низким уровнем урожайности от 10,6 до 19,3 т/га – Третьяковка, Калибр, Сокур, 92–11, 6–14–11, 4530–5.

Высокое содержания крахмала в клубнях в среднем за три года выявлено у сортов Сокур, Аляска, Терра, Краса Мещеры и Сердолик, Пламя и Мариинский. Максимальной в опыте величиной этого показателя характеризовался сорт Сокур, превзошедший наиболее крахмалистый стандарт Гала на 3,4 %. У остальных перечисленных сортов прибавка составляла 0,7...1,2 %. Следует отметить, что раннеспелый сорт Терра, среднеранний сорт Краса Мещеры и среднеспелый сорт Аляска сочетали высокую урожайность с высоким содержанием крахмала в клубнях. Продуктивность указанных сортов варьировала в пределах 24,7...30,1 т/га, а крахмалистость – 14,6...15 % (см. табл. 2).

В процессе селекции современных сортов картофеля оценивают около 50 различных хозяйственно-ценных признаков [19]. Выявить нескоррелированные между собой главные компоненты и коэффициенты нагрузки, отражающие вклад каждой главной компоненты в продуктивность сорта возможно при использовании метода главных компонент [17]. Он позволяет определить признаки, максимально влияющие на продуктивность картофеля в конкретных почвенно-климатических условиях, а также другие тесно связанные между собой признаки, которые при изучении сортов можно условно объединить в один, что позволяет оптимизировать и повысить эффективность оценки новых и перспективных сортов.

Анализ результатов трехлетнего исследования сортов картофеля по комплексу хозяйственно-ценных признаков выявил главные компоненты, на долю которых приходится 73,8 % общего варьирования признаков. Первая компонента позволяет определить признаки, непосредственно влияющие на продуктивность сортов картофеля. На ее долю приходилось 34,6 % варьирования. С максимальной нагрузкой в эту компоненту входили урожайность и устойчивость к вирусам картофеля X, S и M (табл. 3). Таким образом, в условиях недостаточного увлажнения и повышенной температуры воздуха продуктивность изученного набора сортов в наибольшей степени обусловлена полевой устойчивостью к вирусным заболеваниям, а именно к вирусам X, S, и M и в меньшей степени к вирусу Y.

Вторая компонента характеризует тесную связь между полевой устойчивостью сортов картофеля к альтернариозу, Y-вирусу, S- и M-вирусам. Причем поражаемость вирусами S и M находится в отрицательной зависимости от проявления симптомов поражения вирусом Y и альтернариозом, что может быть связано с подавлением SBK и MBK при заражении более вредоносным патогеном. Эта компонента определяет 21,4 % общего варьирования признаков.

Анализ третьей главной компоненты указывает на связь между пораженностью растений картофеля

Табл. 3. Значения веса главных компонентов признаков сортов картофеля (2019–2021 гг.)

Признак	Компонента		
	1	2	3
Урожайность	-0,801*	0,208	-0,146
Устойчивость к ХВК	-0,640*	0,228	0,316*
Устойчивость к YBK	-0,284	0,871*	-0,084
Устойчивость к SBK и MBK	-0,604*	-0,595*	-0,199*
Устойчивость к альтернариозу	0,756	0,257*	0,002
Крахмалистость	0,064	0,092	-0,947*
Дисперсия	2,074	1,283	1,065
Доля влияния компонента на варьирование признаков, %	34,6	21,4	17,8
Накопление дисперсии	34,6	56,0	73,8

\*признаки, входящие в компоненту с максимальными нагрузками.

вирусами X, S, M и крахмалистостью клубней, то есть содержание крахмала в клубнях в определенной степени зависит от степени устойчивости сортов к указанным патогенам. Эта компонента объединяла 17,8 % общего варьирования признаков (см. табл. 3).

**Выводы.** Таким образом, в результате комплексной оценки выделены сорта, сочетающие в почвенно-климатических условиях Самарской области высокие показатели урожайности и полевой вирусоустойчивости – Краса Мещеры (30,1 т/га, устойчивость к X- и Y-вирусам картофеля 9,0 баллов), Сиверский (29,0 т/га, устойчивость к X-вирусу 9,0 баллов, к Y-вирусу 7,8 балла), Аляска (25,4 т/га, устойчивость к X-вирусу 9,0 баллов, к Y-вирусу 8,6 баллов), Дебют (25,0 т/га, устойчивость к X-вирусу 8,4 баллов, к Y-вирусу 8,7 балов).

В стрессовых климатических условиях у изученного набора сортов основным лимитирующим фактором продуктивности была вирусоустойчивость. Для исследованных сортов выявлены три группы тесно связанных признаков, которые при их оценке возможно представить, как один:

урожайность, полевая устойчивость к вирусу X, полевая устойчивость к вирусам S и M – коэффициенты нагрузки компонентов соответственно -0,801; -0,640 и -0,604. Сорт с высокими показателями урожайности с большой долей вероятности имеет высокую полевую вирусоустойчивость;

полевая устойчивость к Y-вирусу, полевая устойчивость к альтернариозу – коэффициенты нагрузки компонентов соответственно 0,871 и 0,257. Сорта, устойчивые к указанному вирусу, вероятно, будут иметь устойчивость к альтернариозу;

крахмалистость клубней, пораженность растений вирусами S и M – коэффициенты нагрузки компонентов соответственно -0,947 и -0,199. Сорта с полевой устойчивостью к указанным вирусам будут характеризоваться более высоким содержанием крахмала в клубнях.

### Литература.

1. Plich J., Boguszewska-Mankowska D., Marczewski W. Relations between photosynthetic parameters and drought-induced tuber yield decrease in Kathadin-derived potato cultivars // *Potato Res.* 2020. Vol. 63. No. 4. P. 463–477. doi: 10.1007/s11540-020-09451-3.
2. Давыденко О. В., Лопух П. С. Влияние термических условий на урожайность картофеля в административных районах Республики Беларусь // *Журнал Белорусского Государственного Университета.*

- География. Геология. 2019. № 1. С. 46–62.
3. Zarzynska K., Boguszewska-Mankowska D., Nosalewicz A. Differences in size and architecture of the potato cultivars root system and their tolerance to drought stress // *Plant Soil Environ*. 2017. Vol. 63. P. 159–164.
  4. Robust potato model: LINTUL-POTATO-DSS / A. J. Haverkort, A. C. Franke, J. M. Steyn, et al. // *Potato Res*. 2015. Vol. 58. No. 4. P. 313–327. doi: 10.1007/s11540-015-9303-7.
  5. Heat tolerance in plants: An overview / A. Wahid, S. Gelani, M. Ashraf, et al. // *Environmental and Experimental Botany*. 2007. Vol. 61. No. 3. P. 199–222.
  6. Physiological and growth responses of potato cultivars to heat stress / R. Tang, S. Niu, G. Zhang, et al. // *Botany*. 2018. Vol. 90. No. 12. P. 813–823. doi: 10.1139/cjb-2018-0125.
  7. Potato viruses and resistance genes in potato / R. Ahmadvand, A. Takacs, J. Taller, et al. // *Acta Agronomica Hungarica*. 2012. Vol. 60. No. 3. P. 283–298. doi: 10.1556/Aagr.60.2012.3.10.
  8. Бакунов А. Л., Дмитриева Н. Н. Выявление биоморфологических показателей, связанных с урожайностью и качеством клубней картофеля в Самарской области // *Известия Самарского центра РАН*. 2014. №5(3). Т. 16. С. 1104–1108.
  9. Кузьминова О. А., Вологин С. Г., Гимаева Е. А., Гизатуллина А. Т., Сташевски З. Вклад признака устойчивости к Y-вирусу картофеля в формирование продуктивности у гибридной популяции картофеля // *Достижения науки и техники АПК*. 2016. Т. 30. №10. С. 18–21.
  10. Головки Т. К., Табаленкова Г. Н. Донорно-акцепторные связи в растении картофеля // *Физиология растений*. 2019. №66 (4). С. 313–320.
  11. Мушинский А.А., Саудабаева А.Ж., Аминова Е.В. Результаты изучения перспективных селекционных гибридов картофеля в орошаемых условиях Оренбургской области // *Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет)*. 2021. № 4 (61). С. 45-52.
  12. Попова Л.А., Головина Л.Н., Шаманин А.А. Экологическая пластичность и стабильность сортообразцов картофеля в условиях архангельской области // *Достижения науки и техники АПК*. 2021. Т. 35. № 4. С. 41-44.
  13. Источники ценных признаков картофеля (*Solanum L.*) по пластичности и стабильности в условиях северной лесостепи Западной Сибири / В. Н. Пакуль, Н. А. Лапишинов, А. Н. Гантимурова и др. // *Сельскохозяйственная биология*. 2019. Т. 54. № 5. С. 978–989. doi 10.15389/agrobiol.2019.5.978rus.
  14. Симаков Е. А., Складорова Н. П., Яшина И. М. Методические указания по технологии селекционного процесса картофеля. М.: ООО Редакция журнала «Достижения науки и техники АПК», 2006. 70 с.
  15. Методика исследований картофеля по защите от болезней, вредителей, сорняков и иммунитету / А. С. Воловик, Л. Н. Трофимец, А. Б. Долягин и др. М.: ВНИИКХ. 1995. С. 92–93.
  16. Методика физиолого-биохимических исследований картофеля / В. П. Кириухин, Е. А. Ладыгина, М. М. Чеголина и др. М. : ВНИИКХ. 1989. С. 6–8.
  17. Харман Г. Современный факторный анализ. М.: Статистика, 1972. 489 с.
  18. Бакунов А. Л., Милехин А. В., Рубцов С. Л. Комплексная оценка сортов картофеля при выращивании в засушливых условиях. // *Вестник КрасГАУ*. 2022. №10. С. 57–64. doi: 10.36718/1819-4036-2022-10-57-64.
  19. Симаков Е. А., Митюшкин А. В., Журавлев А. А. Создание конкурентоспособных сортов картофеля различного целевого назначения // *Вестник КрасГАУ*. 2016. №10. С. 170-178

Поступила в редакцию 19.01.2023  
 После доработки 20.02.2023  
 Принята к публикации 15.03.2023

## УСТОЙЧИВОСТЬ УДВОЕННЫХ ГАПЛОИДОВ РИСА *Oryza sativa* L. ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ СЕЛЕКЦИИ К ПОЛЕГАНИЮ

М.В. Илюшко, кандидат биологических наук,  
М.В. Ромашова, кандидат сельскохозяйственных наук, С.С. Гученко

Федеральный научный центр агробиотехнологий Дальнего Востока имени А.К. Чайки,  
692539, Приморский край, Уссурийск, пос. Тимирязевский, ул. Воложенина, 30  
E-mail: ilyushkoiris@mail.ru

*Изучали фенотипическую изменчивость андрогенных линий удвоенных гаплоидов (DH) риса Oryza sativa L., предназначенных для селекции на устойчивость к полеганию. Исследованные линии получали с использованием гаплоидной технологии в культуре in vitro из гибридов F<sub>2</sub> комбинаций Китаец×(ВНИИР23×Kenzo) – К×В×К (растения № 26 и № 28) и Дон 4237×(Szorvasii 70×Хейлундзян) – Д×З×Х (растение № 8). Стандартом служил сорт Приморский 29. В 2020 г. линии DH и родительские формы выращивали в условиях культуральной комнаты в пластиковых стаканах, наполненных почвой (температура 25 °С, освещенность 5000 лкс, день 16 ч). В 2021 г. семенное потомство предыдущего года высевали на вегетационной площадке в сосудах площадью 1,54 м<sup>2</sup>, наполненных полевой почвой. Каждый образец высевали в 2 ряда, по 25 растений в каждом. По результатам дисперсионного анализа линии DH и родительские формы различались между собой по всем признакам в оба года исследований (p<0,018). Масса зерна метелки возрастала при увеличении диаметра соломины, что отражала средняя корреляционная связь между этими признаками (r=0,63, p<0,05). Линии DH превосходили родительские формы по диаметру соломины на 0,67...1,24 мм, контрольный сорт Приморский 29 – на 0,06...0,61 мм, по индексу ее прочности – на 25...50 %. При этом у большинства изученных линий сохранилась продуктивность метелки на уровне контроля (0,9...1,2 г). Одна линия превысила родительские формы и контрольный сорт по числу зерен на 11,1...16,4 шт. и массе зерна главной метелки на 0,5...0,7 г. От одной из родительских форм линиям DH передана скороспелость. Созданные линии удвоенных гаплоидов целесообразно использовать в селекции риса O. sativa на устойчивость к полеганию.*

## RESISTANCE OF RICE ORYZA SATIVA L. DOUBLED HAPLOIDS TO LODGING FOR THE FAR EASTERN BREEDING

M.V. Ilyushko, M.V. Romashova, S.S. Guchenko

Chaika Federal Scientific Center for Agrobiotechnology of the Far East,  
692539, Primorskii krai, Ussuriisk, pos. Timiryazevskii, ul. Volozhenina, 30  
E-mail: ilyushkoiris@mail.ru

*The phenotypic variability of rice Oryza sativa L. androgenic doubled haploids lines (DH), intended for lodging resistance breeding, was studied. The lines used were obtained from F<sub>2</sub> hybrids of the combinations Kitaets×(VNIIR23×Kenzo) – K×V×K (plants No. 26 and No. 28) and Don 4237× (Szorvasii 70× Heilunjiang) – D×Z×H (plant No. 8). Variety Primorsky 29 served as the standard. In 2020, DH lines and parental forms were grown under the conditions of a culture room in plastic cups filled with soil (temperature 25 °C, illumination 5000 lux, day 16 hours). In 2021 the seed offspring of the previous year were sown on the growing area in vessels 360×60 cm in size, 0.65 m<sup>3</sup> in volume, filled with field soil. Each sample was sown in two rows, 25 plants per row. According to the ANOVA results, the DH lines and parental forms differed from each other in all characteristics in both years (p<0.018). The panicle grain mass rises with an increasing culm diameter, which is appeared in the average correlation of these features (r=0.63, p<0.05). The use of haploid technology anther culture in vitro made it possible to obtain the DH lines exceeded the parental forms by 0.67–1.24 mm and the control variety Primorsky 29 by 0.06–0.61 mm in diameter and straw strength index by 25–50%. At the same time, the productivity of the panicle remained at the control level (0.9–1.2 g) in most of the studied lines. One line exceeded the number of grains by 11.1–16.4 pcs. and the mass of grain of the main panicle per 0.5–0.7 g parental forms and control variety. Early maturity was transferred from one of the parental forms to the DH lines. A number of doubled haploids lines have been created for rice O. sativa breeding for lodging resistance, which is necessary for the Far Eastern rice cultivation.*

**Ключевые слова:** рис (*Oryza sativa* L.), удвоенные гаплоиды, устойчивость к полеганию

**Key words:** *Oryza sativa*, doubled haploids, lodging resistance

Создание полукарликовых форм, несущих ген *sd-1*, с нарушенным биосинтезом гиббереллина, сыграло огромную роль в скачкообразном повышении урожайности риса *Oryza sativa* L. в середине прошлого века. Их появление позволило применять повышенные дозы минеральных удобрений, сохраняя устойчивость растений к полеганию [1, 2, 3]. Современный уровень агротехнологий несколько изменил направление селекционных исследований. Повышению урожайности риса должно способствовать не столько применение удобрений, сколько использование растений иного типа с листьями с высоким фотосинтетическим потенциалом, зеленой фотосинтезирующей осью метелки до окончания созревания, значительно более мощной корневой системой,

высокой поглотительной способностью растворенных минеральных элементов [4, 5, 6]. Одним из необходимых требований к сортам риса остается устойчивость к полеганию [7]. В целом «супер рис» («super-rice») может сочетать высокие урожайность и качество зерна только будучи сбалансированным по множеству показателей («rational design») [8].

Сравнение полукарликовых устойчивых к полеганию растений риса, обладающих геном *sd-1*, с формами несущими иные гены, ответственными за этот признак, по показателям продуктивности на высоком агрофоне оказалось в пользу растений нормальной высоты. К тому же сорта, обладающие геном *sd-1*, плохо адаптируются к изменениям окружающей среды [9]. За устойчивость



к полеганию, кроме этого гена, отвечают локусы количественных признаков *IPA1* и *SCM2* с плейотропным эффектом, обнаруженные разными группами японских и китайских ученых в южных районах выращивания риса в Китае [10, 11]. Устойчивость к полеганию обеспечивается прочностью соломины, которая в свою очередь обусловлена ее диаметром, толщиной стенок и химическим составом в фазе молочно-восковой спелости [12, 13, 14].

Для дальневосточного региона России актуальна проблема полегания риса. Сорт риса Приморский 29, который используют в качестве контроля в конкурсном сортоиспытании, склонен к полеганию. Большинство других сортов так же обладают этим недостатком. Нарращивание продуктивности отдельного растения с использованием современных селекционных методов невозможно без усиления прочности соломы. Кроме того, повышение устойчивости к полеганию облегчает механизированную уборку урожая. Гаплоидные технологии в культуре *in vitro* позволяют в течение одного поколения перевести гибриды в гомозиготные удвоенные гаплоиды (DH), ускоряя селекционный процесс, поэтому широко используются в селекции риса во всем мире [15].

Цель исследования – провести сравнительную оценку андрогенных линий удвоенных гаплоидов риса *Oryza sativa* L. по показателям продуктивности и прочности соломы.

**Методика.** В работе использовали 14 линий удвоенных гаплоидов риса *O. sativa* DH, полученных методом культуры пыльников *in vitro* из гибридов F<sub>2</sub> комбинаций Китаец×(ВНИИР23×Kenzo) – К×В×К (растения № 26 и № 28) и Дон 4237×(Szorvasii 70×Хейлундзян) – Д×З×Х (растение № 8). Гибриды ВНИИР23×Kenzo – В×К и Szorvasii 70×Хейлундзян – Sz×X, сорт Дон 4237 – Д4237, линия Китаец – К поддерживаются в коллекции более 10 лет. Родительские формы характеризуются следующими показателями в условиях Приморского края: В×К – скороспелый, низкорослый гибрид с мел-

кой безостой зерновкой, благодаря полукарликовости не полегает, Sz×X – позднеспелый, остистый гибрид с крупной зерновкой, Дон 4237 – безостый позднеспелый сорт, устойчив к полеганию, Китаец – безостый среднеспелый, соломина тонкая. В качестве контроля был выбран склонный к полеганию районированный сорт Приморский 29, используемый в качестве стандарта в Госсортоиспытании.

В 2020 г. линии удвоенных гаплоидов и родительские формы выращивали в условиях культуральной комнаты (искусственные условия) в пластиковых стаканах, наполненных почвой, при температуре 25 °С, освещенности 5000 лкс, режиме освещения – 16 ч. В каждом пластиковом стакане располагали одно растение. Слой воды создавали после наступления фазы трех листьев.

В 2021 г. семенное потомство предыдущего года высевали 21 мая на вегетационной площадке в сосудах размером 360×60 см, объемом 0,65 м<sup>3</sup>, наполненных почвой. Каждый образец высевали в два ряда с междурядьями 15 см, по 25 растений в ряду в однократной повторности. Для вегетационных опытов использовали почву характерную для рисовых полей – лугово-бурую с тяжелым механическим составом. Содержание органического вещества 5,1 % (ГОСТ 26213-92), подвижных форм фосфора и калия – 28,0 мг/кг и 132,0 мг/кг почвы соответственно (ГОСТ Р 54650–2011), легкогидролизуемого азота – 61,5 мг/кг (ГОСТ 26483-85), рН солевой вытяжки – 5,1.

Режим орошения – укороченное затопление. Метеоусловия в период выращивания изучаемых образцов на вегетационной площадке соответствовали биологическим требованиям культуры, превышая среднемноголетние данные региона на 0,7...1,8 °С. Определяли следующие биометрические показатели: высота растений (см), длина метелки (см), число и масса главной метелки (шт., г), фертильность (%), диаметр соломины главного побега в фазе восковой спелости на высоте 10 см (в 2021 г.),

**Табл. 1. Характеристика удвоенных гаплоидов (DH) риса *Oryza sativa* L., выращенных в условиях культуральной комнаты**

Исходный гибрид, родительская форма	Номер DH	Фенотипический признак						
		высота растения, см	длина метелки, см	число зерен метелки, шт.	фертильность, %	масса зерна метелки, г	диаметр соломины, мм	индекс прочности соломины
К×В×К (26)	152	63,3	13,3*/**	18,8	72,6	0,5	1,3	0,017**
	154	56,8	11,3	20,5	73,6	0,6	1,7	0,019*/**
	158	65,5	13,4*/**	15,5	67,4	0,4	1,3	0,014
	168	69,0*	14,3*/**	19,4	72,1	0,6	1,4	0,015
	169	66,0*	14,4*/**	17,0	60,4	0,5	1,6	0,015
К×В×К (28)	44	62,9	14,0*/**	21,5	65,9	0,6	2,5	0,017
	45	62,0	13,8*/**	23,1	69,7	0,6	1,9	0,018* **
	46	65,4	14,0*/**	17,9	66,4	0,5	1,5	0,017**
	38	49,5	10,8	20,7	54,7	0,5	2,2	0,021*/**
Китаец	–	62,4	12,4	24,5	82,4	0,6	1,9	0,014
ВНИИР3223×Kenzo	–	58,7	11,1	27,1	66,0	0,6	1,9	0,014
Д×S×X	208	51,1	11,4	19,3	52,5	0,5	1,9	0,019*/**
	209	62,3	16,4*/**	18,2	58,0	0,5	1,4	0,018*/**
	213	60,3	15,8*/**	22,9	68,1	0,6*	1,5	0,016
	214	57,4	13,3**	19,6	77,5	0,5	1,9	0,016
	216	60,6	15,5*/**	18,1	66,2	0,5	2,0	0,015
Дон4237	–	63,2	14,2	29,7	69,7	0,6	1,9	0,014
Szorvasii70×Хейлундзян	–	64,3	12,4	17,9	67,7	0,5	1,8	0,016
Приморский 29 (стандарт)		67,0	11,1	24,9	82,3	0,6	1,9	0,013

\*превышение DH над родительской формой при p<0,05; \*\*превышение DH над стандартом при p<0,05.



диаметр соломины главного побега в воздушно сухом состоянии (мм), масса соломы в воздушно сухом состоянии при влажности 15 %. Индекс прочности соломы  $I_c$  рассчитывали по формуле, представленной в работе [16], при оценке придерживались следующей шкалы: до 0,11 ед. – слабая полегающая, до 0,13 ед. – средней прочности, 0,16 ед. и выше – прочная [16].

Объем выборки каждого образца в каждый год исследования составлял 14...15 растений. Сравнительную оценку линий ДН с родительскими формами и контролем проводили методом дисперсионного анализа с использованием программы Statistica 10.

**Результаты и обсуждение.** По результатам дисперсионного анализа линии удвоенных гаплоидов и родительские формы различались между собой по всем признакам как в 2020 г., так и в 2021 г. при  $p < 0,018$ .

В искусственных условиях выращивания по показателям продуктивности родительскую форму превзошла только линия ДН 213 с массой зерна выше, чем у Sz×X, на 0,1 г. Линии 168 и 169 оказались более высокорослыми, чем родительские формы, на 2,0...3,3 см. Самый низкий индекс прочности соломины отмечен у растений сорта Приморский 29 – 0,013 (соломина средней прочности), превосходили стандарт и/или родительскую форму по величине этого показателя 7 линий ДН (соломина прочная). Достоверных различий между сравниваемыми образцами по диаметру соломины не наблюдали (табл. 1).

В естественных условиях выращивания ДН гибридной комбинации К×В×К оказались более высокорослыми, чем родительский гибрид В×К, на 13,8...31,6 см, а по сравнению с Приморским 29 – на 4,0...16,2 см. Масса зерна у растений линии 152 была достоверно больше, чем у родительских форм и стандарта, на 0,5...0,7 г. Превосходили родительские формы по диаметру соломины линии ДН 168, 44, 45 и 46, у которых он достигал 3,0...3,2 мм, по индексу прочности соломины – ДН 152,

168, 38 и 44 с величиной этого показателя 0,020...0,021. Достоверных различий со стандартом по этим двум признакам не наблюдали (табл. 2). Масса зерна главной метелки коррелировала с диаметром соломины ( $r=0,63$ ,  $p < 0,05$ ).

На прочность соломины оказывают влияние условия выращивания. Сорт Приморский 29 в искусственных условиях показал себя как среднерослый (средняя высота растений 67,0 см) со среднепрочной соломиной ( $I_c=0,013$ ), в то время как на вегетационной площадке его высота составила 55,7 см, а  $I_c$  достоверно ( $p < 0,04$ ) увеличился до 0,016 (соломина прочная). Поскольку индекс прочности соломины – величина обратная высоте растения, такую картину можно было бы считать закономерной. Однако линия удвоенных гаплоидов 152 на вегетационной площадке оказалась более высокорослой (71,9 см) при увеличении прочности соломины до 0,020 (различия достоверны при  $p < 0,002$ ). Таким образом,  $I_c$  в большей степени зависит от массы соломины растения, то есть ее сухого вещества. Известен ряд веществ, которые обуславливают прочность соломины риса. Так, для лигнинового синтеза необходим кремнезем [13], содержание которого в шелухе зерновки его выше, чем в соломе [17]. Физическая прочность положительно и высокозначимо коррелирует с общим содержанием калия и кремния в стебле в период налива зерна, а также с общим количеством растворимых сахаров в стебле в фазе молочной спелости и в период полного созревания [13]. У сорта Приморский 29 при естественном освещении  $I_c$  соответствовал значениям прочной соломины – 0,016. Тем не менее, по визуальной оценке в нижнем узле стебля произошел изгиб порядка 30° даже в условиях вегетационной площадки при высокой освещенности стеблестоя (рис. 1).

В полевых условиях на Дальнем Востоке России принята технология посева риса с междурядьями 15 см и нормой высева 7 мл шт. семян на 1 га [18]. При такой

**Табл. 2. Характеристика удвоенных гаплоидов (ДН) риса *Oryza sativa* L., выращенных на вегетационной площадке**

Исходный гибрид, родительская форма	Номер ДН	Фенотипический признак						
		высота растения, см	длина метелки, см	число зерен метелки, шт.	фертильность, %	масса зерна метелки, г	диаметр соломины, мм	индекс прочности соломины
К×В×К (26)	152	71,9*/**	16,8*/**	50,1**	80,8	1,6*/**	3,0	0,020*
	154	54,5*	13,3*	34,1	88,2	1,1	2,3	0,014
	158	54,1*	13,2*	28,3	79,9	0,9	2,7	0,017
	168	65,6*/**	14,3*/**	36,9	76,2	1,1	3,1*	0,020*
	169	62,4*	13,8*/**	29,1	76,0	0,9	2,9	0,017
К×В×К (28)	44	64,0*	15,8*/**	37,5	75,0	1,2	3,2*	0,021*
	45	60,1*	15,3*/**	28,3	70,3	0,9	3,1*	0,017
	46	62,1*	16,2*/**	35,5	73,7	1,1	3,0*	0,017
	38	59,7**	14,1	35,7	80,5	0,7	2,6	0,021*
Китаец	–	63,6	12,8	39,0	92,4	1,1	2,9	0,014
ВНИИР3223×Kenzo	–	40,3	10,1	33,7	83,7	0,9	2,2	0,014
Д×S×X	208	51,6	12,5	38,2	79,0	1,0	2,4	0,015
	209	62,6	14,9**	33,7	73,0	1,1	2,7	0,020
	213	60,9	14,9**	31,3	77,3	0,9	2,7	0,017
	214	57,2	14,9**	36,3	92,2*	1,2	2,8	0,016
	216	64,2	16,1*/**	32,3	81,5	1,0	2,8	0,016
Дон4237	–	61,6	12,6	39,8	80,6	0,8	3,2	0,017
Szorvasi70×Хейлуьндзян	–	69,4	15,1	49,7	89,9	1,6	3,1	0,018
Приморский 29 (стандарт)	–	55,7	11,5	33,9	87,8	1,0	2,8	0,016

\*превышение ДН над родительской формой при  $p < 0,05$ ; \*\*превышение ДН над стандартом при  $p < 0,05$ .



**Рис. 1.** Первое междоузлие соломины риса *Oryza sativa* L. линий удвоенных гаплоидов 209, 169, 46 и сорта Приморский 29 (сверху вниз) в фазе восковой спелости, выращенных на вегетационной площадке.

густоте стояния происходит затенение нижнего яруса и значительное полегание растений риса сорта Приморский 29 и некоторых других сортов (Дальневосточный, Приозерный 61, Дарий 23, Ханкайский 52). Линии удвоенных гаплоидов сохраняли прочность соломины и в условиях культуральной комнаты, и на вегетационной площадке (см. табл. 1, 2). Механическая прочность соломины во многом зависит от содержания калия, кремния и целлюлозы в период созревания зерна [13]. Вероятно, накопление этих элементов в растениях линий удвоенных гаплоидов не зависит от условий выращивания, что можно наблюдать визуально (см. рис. 1) и в виде более высоких значений  $I_c$  (см. табл. 1, 2).

Сравнение удвоенных гаплоидов с родительскими формами показало, что при искусственном освещении пять линий ДН обладали высокопрочной соломиной ( $I_c=0,018...0,021$ ) и превзошли родительские формы по величине индекса прочности. При этом диаметр соломины у всех находился на уровне 1,3...2,5 мм без достоверных различий (см. табл. 1). На вегетационной площадке произошло четкое разделение ДН на две группы (см. табл. 2). В первую попали ДН, полученные из гибрида Д×3×Х, которые сохранили высоту, продуктивность, диаметр и индекс прочности соломины на уровне родительских форм. От сорта Д4237 им передалась устойчивость к полеганию и безостость, от Sz×Х – тенденция к увеличению массы зерновки, по сравнению с Д4237. Большинство удвоенных гаплоидов гибрида К×В×К превзошли родительские формы по высоте растения на 13,8...31,6 см и длине метелки на 3,7...6,7 см, у четырех ДН линий диаметр стебля был больше, чем у стандарта и родительских форм, на 0,1...1,0 мм (3,0...3,2 мм), а индекс прочности соломины выше, чем у родительских форм, на 43...50% ( $I_c=0,020...0,021$ ). Линия 152 превзошла по продуктивности метелки стандарт на 0,6 г, родительскую форму – на 0,7 г. Ранее мы изучали линии этих удвоенных гаплоидов, которые сохранили свои характеристики прочности соломины, в поколении ДН [16]. В условиях 2021 г. они оказались менее продуктивными, чем в предыдущем эксперименте (см. табл. 2). Избыточно жаркое лето, особенно в период цветения риса, снизило завязываемость семян.

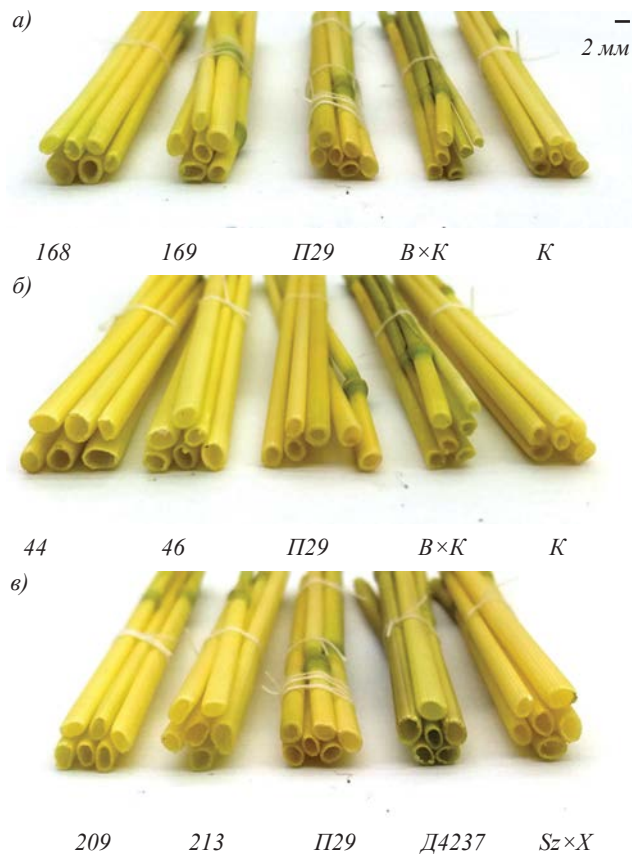
Различия в диаметре соломины в большей степени отразились на срезе второго междоузлия в фазе восковой спелости (рис. 2 а, б). G. R. Merugumala et al. [13] указывают на закладку прочностных характеристик стебля в фазе

начала созревания зерна в зависимости от метаболизма калия, кремния и углеводов. Восемь линий ДН гибридной комбинации К×В×К превзошли родительские формы по диаметру соломины на 0,67...1,24 мм, у двух из них величина этого показателя была больше, чем у стандартного сорта Приморский 29.

Это свидетельствует о закрепившейся положительной трансгрессии удвоенных гаплоидов обеих гибридов комбинации К×В×К по морфологическим показателям и элементам продуктивности, которые при этом сохранили скороспелость от родительских форм.

Наличие у вида *O. sativa* ряда генов устойчивости к полеганию – *sd-1*, *IPA1* и *SCM2* [3, 11, 13] свидетельствует о наличии их в вариабельной части пангенома. Не известно какие из них присутствуют у родительских форм удвоенных гаплоидов, хотя можно предположить наличие *sd-1* у полукарликового гибрида В×К. Все три локуса проявляют плейотропный эффект [3, 11, 13] с множественным влиянием на агрономически важные признаки растения риса [19]. Кроме того, ответственным за устойчивость к полеганию у дальневосточных форм риса *O. sativa* может оказаться новый, еще не идентифицированный, ген. Так или иначе, взаимодействие генотипов формы Kitaез и гибрида В×К привело к усилению прочностных характеристик соломины ряда линий ДН и продуктивности одной линии ДН.

Увеличение продуктивности растения риса возможно при сбалансированном изменении его морфотипа [4, 8].



**Рис. 2.** Срез второго междоузлия соломины риса *Oryza sativa* L. в фазе восковой спелости: а – линии удвоенных гаплоидов риса гибрида К×В×К(26) и родительские формы; б – линии удвоенных гаплоидов риса гибрида К×В×К(28) и родительские формы; в – линии удвоенных гаплоидов риса гибрида Д×S×Х и родительские формы, выращенные на вегетационной площадке.

При этом, с одной стороны, желательна трата ресурсов растения на зерновую часть урожая, с другой, соломина должна быть достаточно прочной для нахождения в вертикальном положении до самой уборки.

**Выводы.** Увеличение элементов продуктивности метелки риса *O. sativa* необходимо проводить одновременно с повышением прочностных характеристик стебля растений. С использованием гаплоидной технологии в культуре *in vitro* удалось получить линии, превосходящие родительские формы и контрольный сорт Приморский 29 по диаметру соломины на 0,67...1,24 мм (3,14...3,71 мм), индексу прочности соломины – на 25...50 % ( $I_c=0,020...0,021$ ). При этом продуктивность метелки у большинства изученных линий сохранилась на уровне стандарта. Линия 152 превзошла сорт Приморский 29 по числу зерен на 16,2 шт., родительские формы и стандартный сорт по массе зерна главной метелки – на 0,6...0,7 г. Абсолютные величины этих показателей у нее составляли соответственно 50,1 шт. и 1,6 г. От одной из родительских форм (ВНИИР3223×Kenzo) линиям удвоенных гаплоидов передалась скороспелость. Таким образом, создан ряд линий для селекции риса *O. sativa* на устойчивость к полеганию, необходимую для дальневосточного рисосеяния.

#### Литература.

1. *Genealogy of the «green revolution» gene in rice / H. Nagano, K. Onishi, M. Ogasawara, et al. // Genes. Genet. Syst. 2005. Vol. 80. P. 351–356. doi: 10.1266/ggs.80.351.*
2. *QTL-seq-based genetic analysis identifies a major genomic region governing dwarfness in rice (Oryza sativa L.) / G. Kadambari, L. R. Vemireddy, A. Srividhya, et al. // Plant. Cell. Reports. 2018. Vol. 37. P. 677–687. doi: 10.1007/s00299-018-2260-2.*
3. *Three genetic systems controlling growth, development and productivity of rice (Oryza sativa L.): a reevaluation of the «green revolution» / F. Zhang, Y.-Z. Jiang, S.-B. Yu., et al. // Theor. Appl. Genet. 2013. Vol. 126. P. 1011–1024. doi: 10.1007/s00122-012-2033-1.*
4. *Deep rooting conferred by DEEPER ROOTING1 enhances rice yield in paddy fields / Y. Arai-Sanoh, T. Takai, S. Yashinaga, et al. // Sci. Rep. 2014. Vol. 4. Article 5563. URL: <https://www.nature.com/articles/srep05563> (дата обращения: 21.05.2022). doi: 10.1038/srep05563.*
5. *Valluru R., Reynolds M. P., Salse J. Genetic and molecular bases of yield-associated traits: a translational biology approach between rice and wheat // Theor. Appl. Genet. 2014. Vol. 127. P. 1463–1489. doi: 10.1007/s00122-014-2332-9.*
6. *Гончарова Ю. К., Гончаров С. В., Чичарова Е. Е. Локализация хромосомных регионов, определяющих эффективность фотосинтеза у российских сортов риса // Генетика. 2018. Т. 54. № 7. С. 785–794. doi: 10.1134/S0016675818070032.*
7. *Development and validation of allele-specific SNP/indel markers for eight yield-enhancing genes using whole-genome sequencing strategy to increase yield potential of rice Oryza sativa L. / S. Kim, J. Ramos, M. Ashikari, et al. // Rice. 2016. Vol. 9. Article 12. URL: <https://thericejournal.springeropen.com/articles/10.1186/s12284-016-0084-7> (дата обращения: 26.05.2022). doi: 10.1186/s12284-016-0084-7.*
8. *Rational design of high-yield and superior-quality rice / D. Zeng, Z. Tian, Y. Rao, et al. // Nature Plants. 2017. Vol. 3. Article 17031. URL: <https://www.nature.com/articles/nplants201731> (дата обращения: 18.12.2021). doi: 10.1038/nplants.2017.31.*
9. *Effect of rice breeding process on improvement of yield and quality in China / F. Cheng, X. Quan, X. Zhenjin, et al. // Rice Sci. 2020. Vol. 27. No. 5. P. 363–367. doi: 10.1016/j.rsci.2019.12.009.*
10. *Isolation of a novel lodging resistance QTL gene involved in strigolactone signaling and its pyramiding with aQTL gene involved in another mechanism / K. Yano, T. Ookawa, K. Aya, et al. // Molecular Plant. 2015. Vol. 8. P. 303–314. doi: 10.1016/j.molp.2014.10.009.*
11. *Genome-wide binding analysis of the transcription activator IDEAL PLANT ARCHITECTURE1 reveals a complex network regulating rice plant architecture / Z. Lu, H. Yu, G. Xiong, et al. // Plant Cell. 2013. Vol. 25. P. 3743–3759. doi: 10.1105/tpc.113.113639.*
12. *Regulation of OsSPL14 by OsmiR156 defines ideal plant architecture in rice / Y. Jiao, Y. Wang, D. Xue, et al. // Nature Genetics. 2010. Vol. 42. No. 6. P. 541–545. doi: 10.1038/ng.591.*
13. *Molecular breeding of «Swarna», a mega rice variety for lodging resistance / G. R. Merugumala, P. V. Satyanarayana, N. Chamundeswari, et al. // Mol. Breeding. 2019. Vol. 39. Article 55. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11032-019-0961-z> (дата обращения: 11.11.2021). doi: 10.1007/s11032-019-0961-z.*
14. *Morphological and molecular characterization of new plant type core set for yield and culm strength traits in rice (Oryza sativa L.) / R. Bagudam, K. B. Eswari, J. Badri, et al. // J. Plant Biochem. Biotechnol. 2021. Vol. 30. P. 233–242. doi: 10.1007/s13562-020-00581-w.*
15. *Sarao N. K., Gosal S. S. In vitro androgenesis for accelerated breeding in rice // Biotechnologies of crop improvement. Springer, Cham. Springer International Publishing AG, Switzerland, 2018. Vol. 1. P. 407–435. doi: 10.1007/978-3-319-78283-6.*
16. *Илюшко М. В., Гученко С. С., Ромашова М. В. Внутрикалусная и межкалусная морфологическая изменчивость удвоенных гаплоидов риса, полученных андрогенезе in vitro // Российская сельскохозяйственная наука, 2020. № 6. С. 11–15. doi: 10.31857/2500262720060034.*
17. *Dependence of porosity of amorphous silicon dioxide prepared from rice straw on plant variety / L. A. Zhemnukhova, A. E. Panasenko, A. A. Artem yanov, et al. // BioResources. 2015. Vol. 10. No. 2. P. 3713–3723. doi: 10.15376/biores.10.2.3713-3723.*
18. *Гученко С. С., Борзаница А. А., Бельская Н. Г. Оценка селекционных образцов риса конкурсного сортоиспытания в условиях Приморского края // Дальневосточный аграрный вестник. 2021. Т. 4. № 60. С. 40–46. doi: 10.24412/1999-6837-2021-4-40-45.*
19. *Гены сельскохозяйственных растений, модифицированные с помощью системы CRISPR/Cas / А. М. Короткова, С. В. Герасимова, В. К. Шумный и др. // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2017. Т. 21. № 2. С. 250–258. doi: 10.18699/VJ17.244.*

Поступила в редакцию 11.07.2022

После доработки 21.02.2023

Принята к публикации 15.03.2023



## СОДЕРЖАНИЕ АМИНОКИСЛОТ В ЗЕРНЕ ОБРАЗЦОВ ЯРОВОЙ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ\*

Дамир Ф. Асхадуллин<sup>1</sup>, Данил Ф. Асхадуллин<sup>1</sup>, Н. З. Василова<sup>1</sup>, Е. В. Зуев<sup>2</sup>, кандидаты сельскохозяйственных наук, А. Р. Хайруллина<sup>1</sup>, научный сотрудник

<sup>1</sup>Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства - обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра КазНЦ РАН, 420059, г. Казань, ул. Оренбургский тракт, 48

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова, 190031, г. Санкт-Петербург, ул. Б. Морская 42-44

Исследования проводили с целью определения различий в содержании аминокислот в зерне пшеницы мировой коллекции ВИР в агроклиматических условиях Республики Татарстан и поиска источников повышенного содержания незаменимых аминокислот, для использования в селекции. Работу выполняли в 2021–2022 гг. на опытном участке, расположенном в 15 км от г. Казань, почва – серая лесная. Изучали 354 образца яровой пшеницы. Содержание семнадцати аминокислот и белка в зерне пшеницы определяли методом спектроскопии в ближней инфракрасной области на приборе DS 2500F фирмы FOSS. Существенное влияние на сумму незаменимых кислот оказывало содержание белка в зерне. Коэффициент корреляции между величинами этих показателей был достоверным положительным в 2021 г. – тесным ( $r = 0,91 \pm 0,02$ ), в 2022 г. – средним ( $r = 0,69 \pm 0,04$ ). Среди изученных аминокислот в зерне исследованных сортов пшеницы больше всего было глутамина (до 2,22 %) и пролина (до 1,55 %). Сорт Raneе (к-26982) служит источником высокого содержания гистидина (0,38...0,40 %), изолейцина (0,53...0,54 %), лизина (0,61...0,62 %), метионина (0,28...0,30 %), фенилаланина (0,66...0,67 %), треонина (0,52...0,56 %) и тирозина (0,31...0,36 %); Panifor – цистеина (0,58...0,63 %), гистидина (0,39 %) и треонина (0,51...0,58 %); Arrino (к-65995) – лейцина (0,82...0,91 %), тирозина (0,31...0,34 %) и валина (0,75...0,78 %). По содержанию лизина в белке (г/100 г белка) выделялись образцы Raneе (к-26982) – 3,63...3,66 и NIL Avocet Yr15 (к-66241) – 2,86...4,52; метионина – Uffo (к-66798) – 1,80...1,81 и Fiorina (к-66034) – 1,70...1,91; треонина – Raneе (к-26982) – 3,04...3,36, Panifor (к-66039) – 3,09...3,20 и Cub (к-62510) – 3,07...3,20; триптофана – Ethos (к-65002) – 2,00...2,27, Тулайковская 108 (к-65452) – 2,01...2,26 и Экада 109 (к-66239) – 2,07...2,14.

## AMINO ACID CONTENT IN SPRING COMMON WHEAT GRAIN

Damir F. Ashadullin<sup>1</sup>, Danil F. Ashadullin<sup>1</sup>, N. Z. Vasilova<sup>1</sup>, E. V. Zuev<sup>2</sup>, A. R. Hajrullina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tatarian Agricultural Research Institute – autonomous structural subdivision of the Federal Research Center of the Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 420059, Kazan, Orenburgskii tr., 48

<sup>2</sup>Federal Research Center the Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 190031, Sankt-Peterburg, Bolshaya Morskaya, 42-44

The aim of the study was to determine the differences in the content of amino acids in wheat grains of the world collection of VIR in the agro-climatic conditions of the Republic of Tatarstan and to search for sources of increased content of essential amino acids for the use of these data in breeding. The study was conducted in 2021–2022 at the experimental base of the Tatar Research Institute of Agriculture of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, located 15 km away from Kazan, the soil of the experimental site is gray forest. 354 samples of spring wheat were studied. The determination of the content of seventeen amino acids and protein in wheat grain was carried out using the near-infrared spectroscopy method on the DS 2500F device from FOSS. The protein content in the grain has a significant effect on the amount of essential acids. The correlation between the protein content and the amount of essential acids in wheat grain is high in 2021.  $r = 0.91 \pm 0.02$  and average in 2022.  $r = 0.69 \pm 0.04$ . The highest content of glutamine in wheat grain was noted – up to 2.22 % and proline – up to 1.55 %. The source of high grain content of histidine 0.38–0.40 %, isoleucine 0.53–0.54 %, lysine 0.61–0.62 %, methionine 0.28–0.30 %, phenylalanine 0.66–0.67 %, threonine 0.52–0.56 % and tyrosine 0.31–0.36 % was the Raneе sample (k-26982). The Panifor sample was a source of high grain content of cysteine 0.58–0.63 %, histidine 0.39 % and threonine 0.51–0.58 %. The Arrino sample (k-65995) is a source of high grain content of leucine 0.82–0.91 %, tyrosine 0.31–0.34 % and valine 0.75–0.78 %. According to the lysine content in protein (grams of amino acid per 100 grams of protein), samples Raneе (k-26982) – 3.63–3.66 and NIL Avocet Yr15 (k-66241) – 2.86–4.52 were isolated. According to the content of methionine in the protein, samples of Uffo (k-66798) – 1.80–1.8 and Fiorina (k-66034) – 1.70–1.91 were isolated. According to the threonine content, three samples Raneе (k-26982) – 3.04–3.36, Panifor (k-66039) – 3.09–3.20 and Cub (k-62510) – 3.07–3.20 were distinguished. The source of the high tryptophan content in the protein were samples Ethos (k-65002) – 2.00–2.27, Tulaykovskaya 108 (k-65452) – 2.01–2.26 and Ekada 109 (k-66239) – 2.07–2.14.

**Ключевые слова:** пшеница, белок, образец, источник, аминокислоты.

**Key words:** wheat, protein, variety, source, amino acids.

Белки играют исключительно важную роль в питании человека и животных. Однако они неодинаковы по своей питательной ценности, различия в которой обусловлены главным образом аминокислотным составом. Если соот-

ношение аминокислот не сбалансированно, то способность организма использовать белок будет пониженной. Аминокислоты, углеродные скелеты которых не синтезируются или синтезируются недостаточно клетками животных и

\* Работа выполнена в рамках государственного задания Татарского НИИСХ – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН, № 122011800138-7 и государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту FGEM-2022-0009 «Структурирование и раскрытие потенциала наследственной изменчивости мировой коллекции зерновых и крупяных культур ВИР для развития, оптимизированного генбанка и рационального использования в селекции и растениеводстве».



человека, относительно метаболических потребностей, называют незаменимыми. Растительные белки дефицитны по большинству незаменимых аминокислот, «идеальным» считают белок молока и куриного яйца [1]. Незаменимы в питании человека и животных валин, гистидин, изолейцин, лейцин, лизин, метионин, тирозин, треонин, триптофан, фенилаланин, цистеин [2]. Если содержание одной незаменимой аминокислоты в рационе меньше, чем требуется организму, ее дефицит ограничивает использование других аминокислот. Производство синтетических аминокислот, применяемых в животноводстве, в РФ составляет в среднем 50 тыс. т в год, однако объём их потребления ежегодно увеличивается на 20 % [3]. Возникающий в результате дефицит можно частично компенсировать путем повышения биологической ценности зерна.

Первая лимитирующая аминокислота в белке пшеницы – лизин, вторая – треонин. Имеются сведения о том, что генетические различия по ее содержанию в зерне разных сортов пшеницы могут достигать более чем 3 раз [4]. Около половины всех аминокислот нерастворимой фракции клейковины пшеницы приходится на глутаминовую кислоту и пролин [5]. При высоком содержании белка, как правило, возрастает доля клейковинных белков с низкой концентрацией лизина [6, 7]. Известно, что содержание аминокислот сельскохозяйственной продукции зависит от уровня минерального питания [8] и агроэкологических условий [9, 10, 11], значительное влияние на величину этого показателя оказывают химические средства защиты и биостимуляторы [12]. Имеются сведения, о высокой наследуемости содержания незаменимых аминокислот в зерне пшеницы [13], то есть возможно использование источников с высокой концентрацией отдельных незаменимых аминокислот в селекционных программах.

Цель исследования – определение различий в содержании аминокислот в зерне пшеницы мировой коллекции ВИР в агроклиматических условиях Республики Татарстан и выявление источников повышенной концентрации незаменимых аминокислот для использования в селекции.

**Методика.** Работу проводили в 2021–2022 гг. в Татарском научно-исследовательском институте сельского хозяйства ФИЦ Казанского научного центра РАН. Изучали 354 образца яровой пшеницы из Австралии,

Белоруссии, Великобритании, Германии, Греции, Испании, Казахстана, Канады, Китая, Кыргызстана, Польши, Португалии, России, США, Украины, Франции, Швейцарии, Швеции и других стран, предоставленных Всероссийским институтом генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова.

Технология возделывания пшеницы включала вспашку зяби (предшественник в 2021 г. фацелия, в 2022 г. яровая пшеница); внесение азотоса 250 кг/га, аммиачной селитры 100 кг/га под культивацию. Посев проводили кассетной сеялкой Неге 90, площадь делянки 1 м<sup>2</sup>, норма высева 6 млн всхожих семян на 1 га. Уход заключался в химических прополках против однолетних злаковых и двудольных сорняков. Уборку осуществляли комбайном Wintersteiger «Classic».

Содержание 17 аминокислот и белка в зерне пшеницы определяли методом спектроскопии в ближней инфракрасной области [14, 15] на приборе DS 2500F фирмы FOSS (Швеция), валидация и градуировка соответствовали ГОСТ ISO 12099-2017. По результатам этого анализа образцы пшеницы ранжировали на группы в соответствии с классификационными нормами, используемыми Госсортомкомиссией [16]: с очень высоким содержанием белка (≥16 %), с высоким (14...15,9 %), средним (13...13,9 %) и ниже среднего (менее 13 %).

Метеорологические условия в весенне-летний период 2021 и 2022 гг. были резко контрастными. В 2021 г. в мае было сухо и тепло, после посева выпало только 10 мм осадков при значительном превышении среднесуточной температуры, в сравнении со среднемноголетними значениями, на 7 °С, ГТК составил 0,31; в июне выпало 10,5 мм осадков в небольших количествах (от 2,5 до 5 мм) при норме 62 мм, ГТК был равен 0,23; в июле выпало 31,5 мм, большей частью в третьей декаде месяца, ГТК в этот период составил 0,46. В 2022 г. май был очень сырой и прохладный, ГТК был равен 3,31; июнь соответствовал средне климатической норме; во второй декаде июля выпала среднемесячная сумма осадков, ГТК в июле составил 0,97; август характеризовался отсутствием осадков и повышенной на 5,5 °С температурой воздуха относительно нормы.

Статистическую обработку результатов исследований проводили методами корреляционного и вариационного анализа [17].

**Табл. 1. Содержание аминокислот в зерне пшеницы, %**

Аминокислота	Среднее,		Размах, min...max		Коэффициент вариации, Cv	
	2021 г.	2022 г.	2021 г.	2022 г.	2021 г.	2022 г.
Аланин	0,48	0,43	0,29...0,75	0,21...0,71	17	17
Аргинин	0,67	0,72	0,54...0,91	0,53...1,00	11	10
Цистеин	0,44	0,53	0,35...0,58	0,36...0,84	10	9
Глутамин	1,35	1,52	0,82...2,22	0,09...2,22	19	22
Глицин	0,47	0,51	0,40...0,62	0,42...0,67	8	8
Гистидин	0,27	0,30	0,11...0,43	0,18...0,39	22	11
Изолейцин	0,41	0,41	0,29...0,55	0,28...0,56	12	13
Лейцин	0,70	0,60	0,51...0,99	0,38...0,84	11	12
Лизин	0,42	0,31	0,27...0,66	0,11...0,62	17	25
Метионин	0,19	0,16	0,11...0,31	0,07...0,30	17	26
Фенилаланин	0,52	0,52	0,43...0,67	0,43...0,68	10	8
Пролин	1,13	1,32	1,00...1,30	1,11...1,55	5	5
Серин	0,51	0,58	0,41...0,67	0,48...0,72	10	7
Треонин	0,37	0,41	0,25...0,57	0,30...0,58	17	10
Триптофан	0,21	0,32	0,16...0,30	0,20...0,39	12	8
Тирозин	0,27	0,18	0,18...0,36	0,06...0,31	11	21
Валин	0,59	0,65	0,49...0,76	0,56...0,83	9	7

**Табл. 2. Источники повышенного содержания незаменимых аминокислот в зерне у образцов яровой мягкой пшеницы**

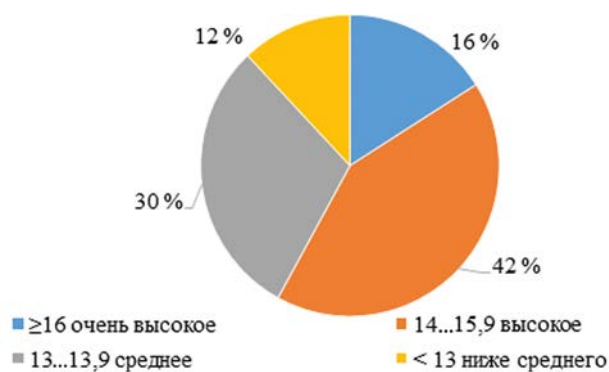
Аминокислота	№ в каталоге ВИР	Происхождение	Образец	Содержание аминокислоты, %	
				2021 г.	2022 г.
Цистеин	66039	Франция	Panifor	0,58	0,63
Гистидин	66039	Франция	Panifor	0,39	0,39
	26982	Австралия, Виктория	Ranee	0,38	0,40
Изолейцин	66449	Испания	Atrevido	0,55	0,52
	26982	Австралия, Виктория	Ranee	0,54	0,53
Лейцин	65995	Австралия, Западная Австралия	Arrino	0,91	0,82
Лизин	26982	Австралия, Виктория	Ranee	0,61	0,62
Метионин	26982	Австралия, Виктория	Ranee	0,28	0,30
Фенилаланин	26982	Австралия, Виктория	Ranee	0,67	0,66
Треонин	66039	Франция	Panifor	0,51	0,58
	26982	Австралия, Виктория	Ranee	0,56	0,52
Триптофан	66195	Китай, Хэнань	Yumai 34	0,29	0,37
Тирозин	26982	Австралия, Виктория	Ranee	0,36	0,31
	65995	Австралия, Западная Австралия	Arrino	0,34	0,31
Валин	65995	Австралия, Западная Австралия	Arrino	0,75	0,78

**Результаты и обсуждение.** При сравнении аминокислотного состава зерна используют показатель содержания аминокислоты в продукте, при определении биологической ценности белка – чаще всего, содержание аминокислот в белке [18, 19]. И в первом, и во втором случае важную роль играет содержание белка в зерне. В нашем исследовании большинство образцов характеризовались очень высоким и высоким содержанием белка – более 14 % (см. рисунок). При этом средняя величина этого показателя по всей выборке в 2021 г. составила 12,4 %, в 2022 г. – 16,5 %. Самыми белковыми были образцы Пушкинская 3 (к - 66404, Россия, Ленинградская обл.) – 18 %, Пушкинская 4 (к - 66405, Россия, Ленинградская обл.) – 18,1 %, Blue-A (к - 43091, Канада) – 18 %, Atrevido (к-66449, Испания) – 18,1 %, Manu (к - 66029, Финляндия) – 18,3 %, Yumai 34 (к -66195, Китай, Хэнань) – 18,7 %. Между содержанием суммы незаменимых аминокислот и белка в 2021 г. отмечена

сильная связь с коэффициентом корреляции Пирсона ( $r$ )  $0,91 \pm 0,02$ , в 2022 г. – средняя ( $r=0,69 \pm 0,04$ ).

Среди изученных аминокислот в зерне исследованных сортов пшеницы больше всего было глутамина (до 2,22 %) и пролина (до 1,55 %), причем для первой аминокислоты свойственна изменчивость от средней до значительной  $Cv = 19 \dots 22$  %, содержание второй было более стабильным  $Cv = 5$  % (табл. 1). Значительные различия между образцами пшеницы по содержанию гистидина отмечали в 2021 г. ( $Cv = 22$  %), лизина, метионина и тирозина – в 2022 г. ( $Cv = 25, 26$  и  $21$  % соответственно).

Для ряда аминокислот, в том числе заменимых глицина, серина, пролина и незаменимых цистеина, фенилаланина, валина, отмечена относительно стабильное ( $Cv = 5 \dots 10$  %) содержание в зерне образцов яровой пшеницы. В то же время выделены генотипы с их повышенной концентрацией. Так, Ranee (к - 26982, Австралия, Виктория) служит источником высокого содержания гистидина (0,38...0,40 %), изолейцина (0,53...0,54 %), лизина (0,61...0,62 %), метионина (0,28...0,30 %), фенилаланина (0,66...0,67 %), треонина (0,52...0,56 %) и тирозина (0,31...0,36 %). Сортообразец Panifor (к-66039, Франция) характеризовался высоким содержанием цистеина (0,58...0,63 %), гистидина (0,39 %) и треонина (0,51...0,58 %); Arrino (к - 65995, Австралия, Западная Австралия) – повышенным содержанием лейцина (0,82...0,91 %), тирозина (0,31...0,34 %) и валина (0,75...0,78 %). Все перечисленные образцы вошли в группу высокобелковых со средней концентрацией белка 16,9 % (табл. 2). Содержание гистидина у них было выше, чем в среднем по всем образцам, на 30 %, изолейцина – на 24 %, лизина – на 41 %, метионина – на 40 %, фенилаланина –



*Доля образцов пшеницы с разным содержанием белка в зерне (среднее за 2021–2022 гг.).*

**Табл. 3. Источники повышенного содержания незаменимых аминокислот в белке у образцов яровой мягкой пшеницы**

Аминокислота	Образец	Происхождение	№ в каталоге ВИР	Содержание аминокислоты, г/100 г белка	
				2021 г.	2022 г.
Лизин	Ranee	Австралия, Виктория	26982	3,66	3,63
	NIL Avocet Yr15	Австралия	66241	4,52	2,86
		среднее по образцам		2,96±0,02	1,90±0,02
Метионин	Uffo	Латвия	66798	1,80	1,81
	Fiorina	Швейцария	66034	1,70	1,91
		среднее по образцам		1,57±0,01	0,97±0,01
Треонин	Ranee	Австралия, Виктория	26982	3,36	3,04
	Panifor	Франция	66039	3,09	3,20
	Cub	Великобритания	62510	3,20	3,07
		среднее по образцам		2,96±0,01	2,51±0,01
Триптофан	Ethos	Германия	65002	2,00	2,27
	Тулайковская 108	РФ, Самарская обл.	65452	2,01	2,26
	Экада 109	РФ, Татарстан	66239	2,07	2,14
		среднее по образцам		1,67±0,01	1,92±0,01

на 22 %, треонина – на 28 %, тирозина – на 31...33 %, цистеина – на 20 %, лейцина – на 25 %, валина – на 19 %.

Кроме валового количества, в селекции на повышенные содержания отдельных аминокислот важна их концентрация в белке. На сегодняшний день используют следующие подходы к конверсии аминокислот в семенах злаков – увеличение содержания запасных белков богатых аминокислотами и (или) блокирование белков бедных одной или несколькими аминокислотами [20]. Селекционное улучшение пшеницы путем изменения содержания более двух незаменимых аминокислот в белке вряд ли возможно, поэтому необходимо уделить внимание одной из наиболее дефицитных: лизину, метионину, треонину и триптофану.

В наших исследованиях по содержанию лизина в белке выделился ранее отмеченный образец Ranee, у которого его концентрация составила 3,65 г/100 г белка, и образец NIL Avocet Yr15 – 3,69 г/100 г белка, что больше среднегрупповой на 33 и 34 % соответственно. По содержанию метионина в белке лучшими были образцы Uffo и Fiorina – 1,81 г/100 г белка, что выше, чем в среднем по всем образцам, на 30 %. По количеству треонина выделились Ranee, Panifor и Cub, среднее его содержание в белке этих образцов составило 3,13...3,20 г/100 г белка, что на 15...18 % выше, чем в среднем по всем образцам. Причем у Ranee и Panifor одновременно отмечали высокое содержание треонина и в зерне. Источником высокого количества триптофана в белке был образец Ethos и два российских сорта Тулайковская 108, Экада 109, у которых оно было выше, чем в среднем по всем образцам, на 15...16 % и находилось в диапазоне 2,11...2,14 г/100 г белка (табл. 3).

**Выводы.** Между содержанием суммы незаменимых аминокислот и белка в зерне отмечена положительная корреляция в 2021 г. она была сильной ( $r=0,91\pm 0,02$ ), в 2022 г. – средней ( $r=0,69\pm 0,04$ ). Среди изученных аминокислот в зерне исследованных сортов пшеницы больше всего было глутамина (до 2,22 %) и пролина (до 1,55 %).

В результате исследований установлены источники высокого содержания ряда аминокислот в зерне:

Ranee (к - 26982, Австралия, Виктория) – гистидина (0,38...0,40 %), изолейцина (0,53...0,54 %), лизина (0,61...0,62 %), метионина (0,28...0,30 %), фенилалани-

на (0,66...0,67 %), треонина (0,52...0,56 %) и тирозина (0,31...0,36 %);

Panifor (к-66039, Франция) – цистеина (0,58...0,63 %), гистидина (0,39 %) и треонина (0,51...0,58 %);

Argino (к-65995, Австралия, Западная Австралия) – лейцина (0,82...0,91 %), тирозина (0,31...0,34 %) и валина (0,75...0,78 %);

источники высокого содержания аминокислот в белке: лизина – Ranee (к-26982, Австралия, Виктория) – 3,63...3,66 г/100 г белка и NIL Avocet Yr15 (к-66241, Австралия) – 2,86...4,52 г/100 г белка;

метионина – Uffo (к-66798, Латвия) – 1,80...1,81 г/100 г белка и Fiorina (к-66798, Швейцария) – 1,70...1,91 г/100 г белка;

треонина – Ranee (к-26982, Австралия, Виктория) – 3,04...3,36 г/100 г белка, Panifor (к-66039, Франция) – 3,09...3,20 г/100 г белка и Cub (к-62510, Великобритания) – 3,07...3,20 г/100 г белка;

триптофана – Ethos (к-65002, Германия) – 2,00...2,27 г/100 г белка Тулайковская 108 (к - 65452, Россия, Самарская обл.) – 2,01...2,26 г/100 г белка и Экада 109 (к-66239, Россия, Татарстан) – 2,07...2,14 г/100 г белка.

#### Литература.

1. Лысиков Ю. А. Аминокислоты в питании человека // *Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология*. 2012. №2. С. 88–105.
2. Hou Y., Wu G., *Nutritionally Essential Amino Acids // Advances in Nutrition*. 2018. Vol. 9. No. 6. P. 849–851. doi: 10.1093/advances/nny054.
3. *Перспективы развития глубокой переработки зерна / Н. Р. Андреев, В. Г. Гольдштейн, Л. П. Носовская и др. // Достижения науки и техники АПК*. 2020. Т. 34. №11. С. 98–103. doi: 10.24411/0235-2451-2020-11115.
4. Yigit A., Erekul O. *Antioxidant Activity and Essential Amino acid Content of Bread Wheat (Triticum aestivum L.) Varieties // Journal of Agricultural Sciences*. 2023. Vol. 29. No. 1. P. 130–141. doi:10.15832/ankutbd.999660.
5. Kaur R., Kaur H., Srivastava P. *Role of tryptophan content in determining gluten quality and wheat grain characteristics // Heliyon*. 2022. Vol. 8. No. 10. Article 10715. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844022020035> (дата обращения: 05.02.2023). doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e10715

6. Vogel K. P., Johnson V. A., Mattern P. J. Reevaluation of Common Wheats from the USDA World Wheat Collection for Protein and Lysine Content (1975) // *Historical Research Bulletins of the Nebraska Agricultural Experiment Station (1913-1993)*. 1993. URL: <http://digitalcommons.unl.edu/ardhistrb/172> (дата обращения: 05.02.2023)
7. Маркс Е. И., Лейболт Е. Л., Заушицына И. Г. Электрофоретические спектры белков и качество урожая пшеницы // *Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет)*. 2015. №4 (37). С. 26–34.
8. Формирование химического состава зерна яровой пшеницы при различном уровне минерального питания / Д. В. Чикишев, Н. В. Абрамов, Н. С. Ларина и др. // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2020. Т. 10. № 3. С. 496–505. doi: 10.21285/2227-2925-2020-10-3-496-505.
9. Горянина Т. А., Макушкин А. Н. Качество зерна сортов озимых тритикале селекции Самарского НИИСХ // *Аграрный научный журнал*. 2021. №7. С. 4–8. doi: 10.28983/asj.y2021i7pp4-8.
10. Асеева Т. А., Зенкина К. В., Ломакина И. В. Хозяйственная и биологическая характеристика перспективного универсального сорта яровой пшеницы Далира // *Достижения науки и техники АПК*. 2020. Т. 34. № 6. С. 59–64. doi: 10.24411/0235-2451-2020-10611.
11. Бельшикина М.Е. Биохимический состав семян раннеспелых сортов сои и его вариабельность в зависимости от сортовых особенностей и метеорологических условий вегетационного периода // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020. № 3 (51). С. 33–40.
12. Influence of seven levels of chemical/biostimulator protection on amino acid profile and yield traits in wheat / Iwaniuk P., Konecki R., Kaczynski P., et al. // *The Crop Journal*. 2022. Vol. 10. No. 4. P. 1198–1206. doi: 10.1016/j.cj.2021.12.007.
13. Jiang X., Wu P., Tian, J. Genetic analysis of amino acid content in wheat grain // *Journal of Genetics*. 2014. Vol. 93. P. 451–458. doi: 10.1007/s12041-014-0408-6.
14. Fontaine J., Schirmer B., Horr J. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) Enables the Fast and Accurate Prediction of Essential Amino Acid Contents. 2. Results for Wheat, Barley, Corn, Triticale, Wheat Bran / Middlings, Rice Bran, and Sorghum // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2002. Vol. 50. No. 14. P. 3902–3911. doi: 10.1021/jf011637k.
15. Near-Infrared Reflectance Spectrophotometry (NIRS) Application in the Amino Acid Profiling of Quality Protein Maize (QPM) / E. O. Alamu, A. Menkir, M. Adesokan, et al. // *Foods*. 2022. Vol. 11. No. 18. Article 2779. URL: <https://www.mdpi.com/2304-8158/11/18/2779> (дата обращения: 07.02.2023). doi: 10.3390/foods11182779.
16. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Технологическая оценка зерновых, крупяных и зернобобовых культур / под общ. ред. М. А. Федина. М.: Госагропром СССР, 1988. 121 с.
17. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Изд. 6-е, стер., перепеч. с 5-го изд. 1985 г. М.: Альянс, 2011. 350 с.
18. Simon Sarkadi L. Amino acids and biogenic amines as food quality factors // *Pure and Applied Chemistry*. 2019. Vol. 91, Issue 2. P. 289–300. doi: 10.1515/pac-2018-0709.
19. Protein content and amino acid composition of commercially available plant-based protein isolates / S.H.M. Gorissen, J.J.R. Crombag, J.M.G. Senden, et al. // *Amino Acids*. 2018. Vol. 50. P. 1685–1695 doi:10.1007/s00726-018-2640-5.
20. Galili G., Amir R., Fernie A. R. The Regulation of Essential Amino Acid Synthesis and Accumulation in Plants // *Annual Review of Plant Biology*. 2016. Vol. 67 P. 153–78. doi: 10.1146/annurev-arplant-043015-112213.

Поступила в редакцию 08.02.2023

После доработки 01.03.2023

Принята к публикации 15.03.2023



**ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ БЕЛКОВЫХ ПОЛИМЕРОВ ЗЕРНА КУКУРУЗЫ КАК ФАКТОР ОТБОРА СОРТООБРАЗЦОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПИТАТЕЛЬНОСТИ КОРМОВ****О.И. Болотова**, кандидат сельскохозяйственных наук, **И.А. Сазонова**, доктор биологических наук, **В.В. Бычкова***Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы, 410050, Саратов, 1-й Институтский проезд, 4 E-mail: gelechrisum@gmail.com*

*Исследование проводили с целью выявления сортобразцов с высоким содержанием полноценного белка для использования в дальнейшей селекционной работе и кормлении животных. Объектами исследования были сортобразцы кукурузы селекции ФГБНУ РосНИИСК «Россорго»: РНИИСК 1, РСК Заря, Радуга, РСК Аврора, РСК Граскorni, Артемида, РСК 7, РСК 3, РСК 354, Нова, Цукерка, 421/20. Работу выполняли в Саратовской области в 2020-2021 гг. Для анализа использовали зрелое измельченное зерно. Исследования проводили методом экстракции для разделения белков на фракции по схеме Осборна в трехкратной повторности. По количеству водорастворимых белков – альбуминов имели превосходство сортобразцы Артемида (16,98 г/100 г белка), Нова (16,83 г/100 г белка), РСК Граскorni (16,32 г/100 г белка) и Цукерка (15,68 г/100 г белка). Наибольшим содержанием глютенинов среди изучаемых образцов характеризовался сорт Радуга (25,69 г/100 г белка), наименьшим – Цукерка (16,68 г/100 г белка). Наибольшее количество проламинов в зерне отмечено у сорта Радуга (23,47 г/100 г белка), за ним следовали линия РСК-7 (22,89 г/100 г белка) и сорт РСК Аврора (22,2 г/100 г белка). Наименьшее содержание нерастворимого белка в остатке зафиксировано в зерне сорта Цукерка (12,45 г/100 г белка). Наиболее полноценным белком, который отличался самым высоким содержанием водо- и солерастворимых фракций при одновременно низком количестве нерастворимого белкового остатка характеризовались гибриды Артемида, Нова.*

**FRACTIONAL COMPOSITION OF PROTEIN POLYMERS OF CORN GRAIN.****O.I. Bolotova, I.A. Sazonova, V.V. Bychkova***Russian Research and Design-Technological Institute of Sorghum and Corn, 410050, Saratov, 1-yi Institutskii proezd, 4 E-mail: gelechrisum@gmail.com*

*The study of the fractional composition of protein polymers of corn grain was carried out in order to identify the most valuable varieties that have a high protein value, which will allow the further use of these varieties of corn as a component of feed. The objects of the study were maize varieties of the FGBNU RosNIISK "Rossorgo" breeding: RNIISK 1, RSK Zarya, Raduga, RSK Aurora, RSK Graskorn, Artemida, RSK 7, RSK 3, RSK 354, Nova, Zukerka, 421/20. The work was carried out in the Saratov region in 2020-2021. Mature crushed grain was used for analysis. The studies were carried out by the extraction method to separate proteins into fractions according to the Osborne scheme in triplicate. In terms of the amount of water-soluble proteins - albumins, the varieties Artemida (16.98 g/100 g of protein), Nova (16.83 g/100 g of protein), RSK Graskorn (16.32 g/100 g of protein) and Zukerka (15.68 g/100 g of protein), the lowest by Zukerka (16.68 g/100 g of protein). The highest amount of prolamins in the grain was noted in the Raduga variety (23.47 g/100 g of protein), followed by the RSK-7 line (22.89 g/100 g of protein) and the RSK Aurora variety (22.2 g/100 g of protein). The lowest content of insoluble protein in the residue was recorded in the grain of the Zukerka variety (12.45 g/100 g of protein). The most complete protein, which was distinguished by the highest content of water- and salt-soluble fractions with a simultaneously low amount of insoluble protein residue, was characterized by Artemis and Nova hybrids.*

**Ключевые слова:** белок, кукуруза, фракция, альбумины, проламины, глобулины, глютенины.**Key words:** protein, corn, fraction, albumins, prolamins, globulins, glutelins.

В современном мире сегодня наблюдается снижение темпов прироста урожайности сельскохозяйственных культур, особенно по сравнению с этими показателями 60...80-х гг. XX в. Поэтому в мире начинает превалировать мнение о том, что развитие производства зерна в пищевых или кормовых целях – заключается в первую очередь в улучшении качества конечного продукта, то есть биохимического состава зерна, в том числе состава его белка. Особое внимание при этом необходимо уделять не столько увеличению содержания белка в зерне, а в изменении его фракционного состава с целью повышения доли полноценных фракций – альбуминов и глутаминов – источников незаменимого для человека и животных лизина [1]. Это касается и такой культуры, как кукуруза. Решением задачи производства зерна с повышенным содержанием полноценного белка занимаются более 50 лет, результатом этой деятельности стали соответствующие гибриды этой культуры. Использование такого зерна для кормления сельскохозяйственных животных позволяет значительно увеличить их продуктив-

ность и сократить затраты белка, используемого в том числе в качестве кормовых добавок, на 20...25 % [2].

Кукуруза (*Zea mays*) – культура высокой продуктивности и многостороннего использования, что обусловлено содержанием в зерне углеводов (65...70 %), белка (9...12 %), жира (4...8 %), минеральных солей, витаминов, незаменимых аминокислот и других веществ [1]. В развивающихся странах кукуруза служит основным продуктам питания для значительной части населения [3].

Кукурузный белок широко используют в кормах для различных животных, птиц, рыб. Общеизвестно, что важным показателем биологической ценности протеина служит его аминокислотный состав [4]. Например, для обеспечения высоких темпов роста птицы и ее продуктивности необходимо относительно высокая концентрация аминокислот, каждая из которых выполняет свою функцию [5].

Благодаря низкому содержанию золы и легкой усвояемости, белок кукурузы отлично подходит для производства кормов. Птицефабрики используют его

для ускоренного приобретения яичной скорлупой интенсивной натуральной пигментации и окрашивания желтка в более яркий цвет [6].

В то же время биологическая ценность белка в зерне кукурузы составляет всего 40 % от уровня казеина. Общее его содержание, по данным ВИР (Всероссийский институт растениеводства), варьирует от 4,9 до 23,6 % [6]. Белки зародыша зерна кукурузы богаты незаменимыми аминокислотами, которые достаточно хорошо сбалансированы, чего нельзя сказать об аминокислотном составе белков эндосперма [7]. При этом зародыш, как правило, при переработке кукурузы удаляют, что в целом мало влияет на общее содержание белка в получаемом продукте, так как зародыш составляет лишь 9...10 % зерна кукурузы.

Белковые фракции зерна различаются по аминокислотному составу и содержанию незаменимых аминокислот, от которых зависит биологическая ценность белков [8]. Наиболее высокую биологическую ценность имеют водорастворимые белки – альбумины, в составе которых все незаменимые аминокислоты содержатся почти в оптимальных соотношениях, отмечается лишь некоторый дефицит метионина. Глобулины (солеорастворимые белки зерна) характеризуются хорошо сбалансированным аминокислотным составом несмотря на то, что содержание таких незаменимых аминокислот, как метионин, триптофан и лейцин понижено, по сравнению с альбуминами [8, 9]. Глютелины (щелочерастворимые белки) у зерна кукурузы характеризуются довольно сильным дефицитом лизина, триптофана и метионина. Главные запасные белки зерна кукурузы – проламины (спирторастворимые белки) имеют наименьшую биологическую ценность [10]. Они характеризуются очень низким содержанием лизина, триптофана и метионина, а также высокой концентрацией глутаминовой кислоты и пролина. Проламины кукурузы (зеины) отличаются от белков других злаковых тем, что лучше всего растворяются в 90...93 %-ном этиловом спирте [11].

На долю зеина приходится примерно 50...70 % эндосперма, тогда как на глобулины – 3...8 % [6], глютелины – 28...34 %, альбумины – 3...18 % [12]. Зеин, в свою очередь, подразделяется на  $\alpha$ -зеин, растворимый в 60...70 %-ном этаноле и  $\beta$ -зеин, растворимый в этаноле большей концентрации (85...96 %) [13].

Как правило, в зеине содержится больше лейцина (18,7 %), фенилаланина (5,2 %), изолейцина (3,8 %), валина (3,6 %) и тирозина (3,5 %), но мало таких незаменимых аминокислот, как треонин (3 %), гистидин, цистеин (1%), метионин (0,9 %) и лизин (0,1 %), почти отсутствует триптофан [14].

Многие литературные источники содержат сведения о том, что качество зерна и состав его компонентов формируется в результате сложных процессов метаболизма, происходящих в растениях под действием внешней среды [1, 5, 15]. Очевидно, что непосредственное влия-

ние на качество белков будут оказывать метеоусловия вегетационного периода [6, 13].

Изучение различных сортообразцов кукурузы, в том числе гибридов и линий, по содержанию белка и его полноценности способствует выявлению и дальнейшему использованию наиболее перспективных селекционных форм в условиях Среднего Поволжья. Одновременно, сведения о полноценности белков зерна кукурузы (аминокислотный состав, растворимость) дают возможность планировать направления дальнейшего улучшения селекционного материала, используемого для создания новых генотипов с высоким качеством продукции.

Несмотря на то, что зерно кукурузы – один из важнейших компонентов кормов в животноводстве, оно не обеспечивает достаточную питательность рационов из-за дефицита незаменимых аминокислот. Среди причин такой ситуации – повышенное содержание проламиновой фракции, которая характеризуется недостаточной питательностью. Поэтому в корма нередко добавляют дополнительные компоненты, богатые такими аминокислотами, как лизин или триптофан.

Цель исследований – выявить сортообразцы кукурузы с наибольшим содержанием полноценных фракций белка в зерне для использования в дальнейшей селекционной работе и кормлении животных.

**Методика.** Полевые исследования проводили на опытном поле ФГНУ РосНИИСК «Россорго». Почва экспериментального участка – южный чернозем, среднесуглинистый по механическому составу. Содержание гумуса составляет 3,7%, нитратного азота – от 3,5 до 4,2 мг на 100 г почвы, подвижного фосфора (по Мачигину) – от 3,2 до 3,8 мг, обменного калия (по Масловой) – от 18 до 23 мг. Кислотность почвенного раствора близка к нейтральной.

Опытные делянки размещали по черному пару. Весной перед посевом по мере созревания почвы участок бороновали в два следа, до посева проводили две культивации. Уборку урожая проводили вручную, початки растений крайних рядов из анализа исключали.

В качестве материала для исследований были выбраны 12 образцов кукурузы селекции ФГБНУ РосНИИСК «Россорго»: сорта РНИИСК 1, РСК Заря, Радуга, РСК Аврора, Цукерка, гибриды (гибридные популяции) РСК Граскорн, Артемида, Нова, линии РСК 7, РСК 3, РСК 354, 421/20. Большинство образцов относится к группе раннеспелых (за исключением двух средне-спелых – Нова и 421/20). Выбор изучаемых образцов обоснован их высокой адаптацией к местному климату и продуктивностью.

Для проведения анализов использовали зрелое измельченное зерно кукурузы. Белок на фракции разделяли методом экстракции по схеме Осборна, которая предусматривает последовательное извлечение белков дистиллированной водой, 0,5 М раствором хлористого

Табл. 1. Характеристика метеоусловий в период проведения опытов

Год	Май			Июнь			Июль			Август			Сентябрь		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<b>Количество осадков, мм</b>															
2020	14,00	9,20	24,80	13,80	18,20	60,20	12,60	19,80	25,20	52,40	21,80	12,40	0,00	13,50	0,50
2021	17,30	15,20	3,30	42,00	12,60	2,40	13,00	8,20	23,60	0,00	1,00	3,40	33,10	1,00	44,90
<b>Среднедекадная температура, °С</b>															
2020	16,20	14,30	15,50	19,45	22,30	20,70	25,90	24,10	21,90	22,60	19,20	20,40	18,20	16,40	16,80
2021	18,40	22,20	21,70	20,30	23,80	27,40	23,25	25,90	22,60	25,50	26,90	22,30	18,40	15,90	12,40

**Табл. 2. Фракционный состав белка зерна кукурузы (урожай 2020 г.), г/100 г белка**

Сортообразец	Белковая фракция			
	альбумины	глобулины	проламины	глутелины
Артемид	13,57	10,14	18,94	22,67
РСК-3	11,98	8,77	23,25	25,07
Нова	13,19	9,72	17,95	23,81
РСК Заря	12,30	10,06	19,48	26,67
РНИИСК 1	10,61	8,66	23,04	24,51
РСК 354	10,96	7,91	20,21	24,23
РСК Аврора	11,63	8,16	24,92	24,81
Цукерка	14,84	6,38	10,68	16,68
421/20	10,94	8,14	19,25	18,37
РСК-7	11,07	9,60	24,43	23,92
Радуга	9,30	7,91	24,62	26,95
РСК Граскорн	14,92	9,95	20,37	26,74
НСР <sub>05</sub>	1,30	2,05	1,53	2,05

калия, 70 %-ным раствором этанола и 0,2 %-ным раствором едкого натра.

Исследования проводили в трехкратной повторности, результаты подвергли двухфакторному дисперсионному анализу – по сортам и по годам с последующей обработкой данных с помощью программы Agros 2.09 [16].

В работе оценивали количественное содержание белковых фракций зерна кукурузы как качественный показатель, характеризующий селекционный материал. Кроме того, анализировали воздействие погодных факторов 2020 и 2021 гг., которые характеризовались различными гидротермическими условиями (табл. 1).

В 2020 г. за весь вегетационный период средняя температура воздуха составляла 19,6 °С, сумма осадков в среднем за декаду – 19,89 мм. Во второй декаде июля и третьей декаде августа осадков не наблюдали. В 2021 г. среднедекадная температура в районе проведения опытов за период вегетации составляла 21,8 °С, сумма осадков в среднем за декаду – 14,73 мм. В первой декаде августа осадков не наблюдали. Таким образом, в 2021 г. погода была более засушливой и жаркой, чем в 2020 г.

**Результаты и обсуждение.** В 2020 г. высокое содержание водорастворимых белков – альбуминов было отмечено у образцов Артемид – 13,57 г/100 г, Нова – 13,19 г/100 г, Цукерка – 14,84 г/100 г и РСК Граскорн – 14,92 г/100 г белка соответственно (табл. 2). У образцов РСК 3, РСК Заря, РНИИСК 1, РСК 354, РСК Аврора, 421/20 и РСК 7 величина этого показателя была ниже, чем у ранее перечисленных, от 16 % до 22 %. Наименьшее содержание альбуминов выявлено у сорта Радуга – на 33,6% ниже максимальной величины этого показателя в выборке.

Анализ содержания глобулинов не выявил значимых различий между сортообразцами кукурузы, за исключением сорта Цукерка, у которого оно было самым низким – 6,38 г/100 г белка, что меньше максимальной величины этого показателя в выборке на 37 %. У остальных образцов содержание глобулиновой фракции варьировало от 7,91 г/100 г белка (линия РСК 354) до 10,14 г/100 г белка (образец Артемид).

Значимых различий между большинством сортообразцов кукурузы по содержанию глутелинов также не наблюдали. Наименьшим оно было у образцов Цукерка – 16,68 г/100 г белка и 421/20 – 18,37 г/100 г белка, что соответственно на 30 % и 23 % ниже средней величины этого показателя по выборке и почти на 40 % меньше, чем у лидера – сорта Радуга (26,95 г/100 г). Высокий

уровень содержания глутелинов также отмечали у сорта РСК Заря (26,67 г/100 г белка) и гибридной линии РСК Граскорн (26,74 г/100 г белка).

Содержание проламинов в зерне кукурузы варьировало от 10,68 г/100 г белка (сорт Цукерка) до 23,04; 23,25; 24,43 и 24,62 г/100 г белка у образцов РНИИСК 1, РСК 3, РСК 7 и Радуга соответственно.

Наименьшее содержание нерастворимого белка отмечено у гибрида РСК Граскорн (28,01 г/100 г белка), наибольшее – у сорта Цукерка (51,42 г/100 г белка).

В зерне кукурузы урожая 2021 г. фракционный состав белка характеризовался широкой вариативностью (табл. 3). Содержание альбуминов в зерне гибридов Артемид и Нова было значительно выше, чем у других генотипов, и составляло 20,38 и 20,47 г/100 г белка соответственно. Самым низким оно было у линии РСК – 3 (13,40 г/100 г белка). Между показателями остальных образцов достоверных различий не наблюдали.

Наименьшим содержанием глобулинов характеризовался сорт Цукерка, у которого оно было в 2 раза ниже, чем у образца Нова (13,68 г/100 г белка). Между другими генотипами значимые различия отсутствовали. Аналогичная картина отмечена по глутелинам. Разница по содержанию этой фракции у указанных образцов также составляла почти в 2 раза, а его абсолютные величины были равны соответственно 16,67 и 30,49 г/100 г белка. У других образцов диапазон варьирования находился в интервале от 20,58 г/100 г белка (РСК 354) до 26,81 г/100 г белка (421/20).

Низкое содержание проламиновой фракции отмечено у сортов Цукерка – 14,22 г/100 г белка, РНИИСК 1 – 14,08 и РСК 354 – 15,57 г/100 г белка. У образцов Радуга, РНИИСК 7, Нова оно составляло соответственно 22,31; 21,34 и 20,89 г/100 г белка.

**Табл. 3. Фракционный состав белка зерна кукурузы (урожай 2021 г.), г/100 г белка**

Сортообразец	Белковая фракция			
	альбумины	глобулины	проламины	глутелины
Артемид	20,38	10,95	17,99	25,52
РСК-3	13,40	10,01	19,72	23,46
Нова	20,47	13,68	20,89	30,49
РСК Заря	15,61	8,86	16,92	21,83
РНИИСК 1	16,61	8,56	14,08	22,18
РСК 354	14,02	8,92	15,57	20,58
РСК Аврора	16,50	9,49	19,47	24,33
Цукерка	16,51	6,20	14,22	16,67
421/20	14,49	9,64	19,08	26,81
РСК-7	14,95	8,98	21,34	24,55
Радуга	15,42	9,09	22,31	24,43
РСК Граскорн	17,72	9,11	18,33	23,53
НСР <sub>05</sub>	1,66	1,30	1,01	1,92

В условиях 2021 г. среднее содержание альбуминовой фракции в зерне исследуемых образцов было выше, чем в 2020 г. на 34 %, что может указывать на его зависимость от метеорологических условий в годы исследования – более высокой температуры и пониженного количества осадков вегетационного периода. При этом содержание проламинов в 2021 г. несущественно снижалось, по сравнению с предыдущим годом, на 11 %.

В среднем за 2 года самое высокое содержание глобулиновой фракции, которая характеризуется значительным количеством незаменимых аминокислот, зафиксировано у образцов Артемид и Нова – 10,54 и 11,70 г/100 г белка соответственно (табл. 4). У сорта



**Табл. 4. Полноценность белка кукурузы по фракционному составу (среднее за 2020–2021 гг.), г/100 г**

Сортообразец	Белковая фракция			
	альбумины	глобулины	проламины	глутелины
Артемид	16,98	10,55	18,47	24,10
РСК-3	12,69	9,39	21,49	24,27
Нова	16,83	11,70	19,42	27,15
РСК Заря	13,96	9,46	18,20	24,25
РНИИСК 1	13,61	8,61	18,56	23,35
РСК 354	12,49	8,42	17,89	22,41
РСК Аврора	14,07	8,83	22,20	24,57
Цукерка	15,68	6,29	12,45	16,68
421/20	12,72	8,89	19,17	22,59
РСК-7	13,01	9,29	22,89	24,24
Радуга	12,36	8,50	23,47	25,69
РСК Граскорн	16,32	9,53	19,35	25,14
Среднее значение по годам	14,22	9,12	19,46	23,70
НСР <sub>05</sub> (сорт)	1,53	1,05	2,25	2,05
НСР <sub>05</sub> (год)	0,82	0,29	0,34	0,18
F <sub>A</sub> (сорт)	268,61	25,75	28,97	26,68
F <sub>B</sub> (год)	79,63	21,10	50,92	0,01
F <sub>AB</sub>	106,01	7,53	10,21	17,23

Цукеркаоно было ниже максимальной в выборке величины этого показателя на 46 % (6,29 г/100 г белка).

Сорт Цукерка, наряду с низким содержанием глобулинов, характеризовался и наименьшим уровнем белков с неполноценным аминокислотным составом – глутелинов и проламинов. Их содержание было равно 16,67 и 12,45 г/100 г белка соответственно. В то же время, у него отмечено наибольшее количество нерастворимого остатка (78,90 г/100 г белка), что может свидетельствовать о низкой переваримости белка зерна этого сорта.

Высокое содержание глутелинов выявлено у образца Нова – 27,15 г/100 г белка, одновременно он характеризовался наименьшим содержанием нерастворимого остатка – 25,06 г/100 г белка. У сотообразцов РСК 3, РСК Аврора, РСК 7 и Радуга отмечено большое содержание проламинов – 21,49; 22,19; 22,89 и 23,47 г/100 г белка соответственно.

Учитывая, что альбуминовая фракция наиболее полноценна и содержит все незаменимые аминокислоты – среди изученных образцов следует выделить образцы Артемид, Нова, Цукерка и РСК Граскорн, у которых ее содержание составляло 16,97; 16,83; 15,68 и 16,32 г/100 г белка соответственно, что превышало величину аналогичного показателя у других сортообразцов на 15...25 %.

Наибольшее содержание протеина выявлено у сорта Цукерка в 2021 г. Кроме того, он выделяется высоким содержанием альбуминовой фракции (15,68 г/100 г), наименьшим – глобулиновой (6,29 г/100 г), а также низким содержанием неполноценного белка – проламинов (12,45 г/100 г белка). В то же время зерно этого сорта характеризовалось высокой концентрацией нерастворимого осадка белка (в пределах 50 %), что свидетельствует о его низкой перевариваемости.

Перспективный образец для использования в селекции – гибрид Артемид, зерно которого содержит белок с наиболее полноценным фракционным составом: высокая доля альбуминов (16,98 г/100 г) и глутелинов (24,1 г/100 г); низкая – проламинов (18,47 г/100 г) и не-

растворимого остатка, что указывает на его высокую питательную ценность.

Высокой полноценностью белка характеризуется образец Нова, у которого доля альбуминовой фракции составляла 16,83 г/100 г. При этом содержание проламинов в его зерне достигало 19,42 %. К его недостаткам можно отнести наибольшее количество глутелинов в 2021 г. было (30,49 г/100 г).

**Выводы.** Исходя из полученных результатов, выделены образцы кукурузы, которые имеют преимущество по содержанию более полноценной альбуминовой фракции белка – Артемид, Нова, РСК Граскорн и Цукерка, что позволяет рекомендовать их для использования в дальнейшей селекционной работе с целью создания перспективных сортов с высоким качеством белка. Гибридные линии Артемид и Нова целесообразно рекомендовать для использования в кормопроизводстве с целью повышения питательности рационов.

### Литература

1. Shah T.R., Parsad K., Kumar P. Maize - a potential source of human nutrition and Maize-A potential source of human nutrition and health // *Cogent Food Agric.* 2016. Vol. 2. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23311932.2016.1166995> (дата обращения: 09.09.2022). doi: 10.1080/23311932.2016.1166995.
2. Тупольских, Т. И., Вишнякова Т. А. Анализ влияния химических способов замачивания зерна кукурузы на растворимость белков // *Молодой исследователь Дона.* 2018. № 2(11). С. 102-106.
3. Тосунов Я.К., Чернышева Н.В., Барчукова А.А. Влияние обработки семян кукурузы агрохимикатом Вуксал Тернос Универсал на рост, формирование репродуктивных органов и урожайность кукурузы // *Плодородие.* 2018. №6. С.23-26.
4. Продуктивные гибриды кукурузы для успешного агробизнеса // *Аграрная наука.* 2020. № 9. С. 65.
5. Martinez E.L., Fernandez F.J.B. Economics of corn production, marketing and use // *Chemistry and technology / ed. S.O. Serna-Saldivar.* Amsterdam: Elsevier, 2018. P. 87-106.
6. Экологическое изучение гибридов кукурузы в степной зоне Нижнего Поволжья / С. А. Зайцев, Д. П. Волков, Л. А. Гудова и др. // *Аграрный научный журнал.* 2022. №4. С.13-17. doi 10.28983/asj.y2022i4pp13-17.
7. Bouis H.E, Saltzman A. Improving nutrition by bio-enrichment: A review of Harvest Plus, 2003 through 2016 // *Glob Food Security.* 2017. Vol. 12. P. 49-58. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211912417300068?via%3Dihub> (дата обращения: 25.10.2022). doi: 10.1016/j.gfs.2017.01.009.
8. Айрумьян В.Ю., Сокол Н. В., Ольховатов Е. А. Химический состав продуктов переработки зерна риса и кукурузы для повышения пищевой и биологической ценности хлебобулочных изделий // *Ползуновский вестник.* 2020. № 3. С. 3-10. doi 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.03.001.
9. Wu Y., Messing J. Proteome balancing of the maize seed for higher nutritional value // *Front. Plant. Sci.* 2014. Vol. 5. P. 240–252. doi: 10.3389/fpls.2014.00240.
10. Ranum P., Pena-Rosas J.P., Garcia-Casal M.N. Global maize production, utilization, and consumption // *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 2014. Vol. 105. P. 1312–1337.
11. Evaluation of maize germplasm based on zein polymorphism from the archipelago of Madeira / I.R.A. Freitas, F. Ganança, T. Santos, et al. // *Maydica.* 2005. Vol. 50. P. 105–112.



12. Landry J., Delhaye S., Damerval C. Protein distribution pattern in flourey and vitreous endosperm of maize grain // *Cereal Chem.* 2004. Vol. 81. P. 153–158. doi: 10.1094/CCHEM.2004.81.2.153.
13. Temporal patterns of gene expression in developing maize endosperm identified through transcriptome sequencing / G. Li, D. Wang, R. Yang, et al. // *Proceed. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2014. Vol. 111. P. 7582–7587. doi: 10.1073/pnas.1406383111.
14. Осборн Т.Б. Растительные белки / Перев. с англ. под редакцией проф. А.Р. Казель. М.; Л.: Биомедгиз. 1935. 220 с.
15. Бутовец Е. С., Красковская Н. А., Даниленко И. Н. Многокритериальная оценка гибридов кукурузы в условиях Приморского края // *Земледелие.* 2020. № 4. С. 26–28. doi 10.24411/0044-3913-2020-10407.
16. Мартынов С.П. Статистический и биометрико-генетический анализ в растениеводстве и селекции. Пакет программ "AGROS 2.09". Тверь. 1999.
17. Селекция новых гибридов кукурузы с пониженной уборочной влажностью зерна / А. В. Гульяшкин, Н. А. Лемешев, А. А. Земцев и др. // *Труды Кубанского государственного аграрного университета.* 2020. № 85. С. 61–67. doi: 10.21515/1999-1703-85-61-67.

**Поступила в редакцию 13.12.2022**

**После доработки 27.01.2023**

**Принята к публикации 09.03.2023**

**МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ И САХАРОКИСЛОТНЫЙ КОМПЛЕКС ИНТРОДУЦИРОВАННЫХ И МЕСТНЫХ СЕЛЕКЦИОННЫХ СОРТОВ ЧЕРЕШНИ, ВЫРАЩИВАЕМЫХ В ДАГЕСТАНЕ\*****Б. М. Гусейнова, доктор сельскохозяйственных наук, Р. Т. Мусаева**Федеральный аграрный научный центр Республики Дагестан,  
367014, Махачкала, мкр. Научный городок, ул. Абдуразака Шахбанова, 30  
E-mail: batuch@yandex.ru

*Исследования проводили с целью определения селекционно-технологических приоритетов сортов черешни, культивируемых в предгорном Дагестане. Изучали минеральный состав, содержание сахаров и кислот. Работу выполняли в 2020–2022 гг. общепринятыми методами. Объекты исследования – плоды 8 интродуцированных и 12 местных селекционных сортов черешни. Содержание калия в зависимости от сорта составляло 80,6...312,5 мг%; кальция – 10,0...35,6; натрия – 9,4...48,9; магния – 7,7...21,2; фосфора – 25,6...55,1; железа – 0,19...1,02; меди – 0,08...0,63; марганца – 0,11...0,68 и цинка – 0,31...0,94 мг%. Наибольший суммарный запас макроэлементов отмечен в плодах сортов Гудзон – 427,7 мг%; Валерий Чкалов – 335,2; Винка – 320,8; Лезгинка – 294,6; Дурона де Виньола (сек.) – 284,3; Дагестанская черная – 271,4 и Поздняя Лермонтова – 271,0 мг%. Высокое количество микроэлементов (2,18...1,79 мг%) зафиксировано в плодах сортов Валерий Чкалов, Гудзон, Дурона де Виньола (сек.), Крупноплодная, Бигарро Краинского, Дагестанская ранняя, Дагестанская черная и Поздняя Лермонтова. У значительного количества сортов (Полянка, Гудзон, Винка, Романтика, Бигарро Краинского, Буйнакская черная, Лезгинка, Ленинградская гвардейская и Поздняя Лермонтова) общее содержание сахаров находилось в пределах 11,2...12,8 %, а концентрация кислот составляла 0,63...1,10 %. Самыми перспективными для оптимизации промышленного сортамента черешни в условиях Дагестана, использования в селекционной работе и проектировании новых специализированных продуктов питания, следует считать сорта Валерий Чкалов, Винка, Дурона де Виньола (сек.), Гудзон, Крупноплодная, Бигарро Краинского, Дагестанская черная, Лезгинка и Поздняя Лермонтова, отличающиеся наибольшей способностью накопления минеральных веществ, сахаров и кислот в плодах.*

**CONTENT OF MINERAL SUBSTANCES AND SUGAR ACID COMPLEX OF INTRODUCED AND LOCAL BREEDING VARIETIES OF CHERRIES GROWN IN DAGESTAN****B. M. Guseinova, R. T. Musaeva**Federal Agricultural Research Center of the Republic of Dagestan,  
367014, Makhachkala, mkr. Nauchnyi gorodok, ul. Abdurazaka Shakhbanova, 30  
E-mail: batuch@yandex.ru

*In sweet cherry varieties cultivated in foothill Dagestan, to establish their selection and technological priorities, the mineral composition was studied, the content of sugars and acids was determined by generally accepted analysis methods. The subjects of the study were fruits of 8 introduced and 12 local breeding varieties of sweet cherries, which, depending on the variety, contained: potassium 80.6-312.5; calcium 10.0-35.6; sodium 9.4-48.9; magnesium 7.7-21.2; phosphorus 25.6-55.1; iron 0.19-1.02; copper 0.08-0.63; manganese 0.11-0.68 and zinc 0.31-0.94 mg%. The best in terms of the total supply of macroelements in fruits were varieties: Gudzon – 427.7; Valeriy Chkalov – 335.2; Vinka – 320.8; Lezginka – 294.6; Durova de Vinola (sek.) – 284.3; Dagestanskaya chernaya – 271.4 and Pozdnyaya Lermontova – 271.0 mg%. A large amount of microelements (2.18-1.79 mg%) were found in the fruits of the varieties Valeriy Chkalov, Gudzon, Durova de Vinola (sek.), Krupnoplodnaya, Bigarro Krainskogo, Dagestanskaya rannaya, Dagestanskaya chernaya and Pozdnyaya Lermontova. Most varieties of sweet cherries: Polyanka, Gudzon, Vinka, Romantika, Bigarro Krainskogo, Buiynskaya chernaya, Lezginka, Leningradskaya gvardeyskaya and Pozdnyaya Lermontova, the total amount of sugars ranged from 11.2-12.8 %, and the concentration of acids was 0.63-1.10 %. The most promising for the optimization of the industrial variety of sweet cherries in the conditions of Dagestan, the use in selection work and the design of new specialized food products, were the varieties Valeriy Chkalov, Vinka, Durova de Vinola (sek.), Gudzon, Krupnoplodnaya, Bigarro Krainskogo, Dagestanskaya chernaya, Lezginka and Pozdnyaya Lermontova, distinguished by the greatest ability formation of mineral substances, sugars and acids in fruits.*

**Ключевые слова:** черешня (*Prunus avium* L.), сорт, дагестанские селекционные сорта, интродуцированные сорта, минеральные вещества, сахара, титруемые кислоты

**Key words:** sweet cherries (*Prunus avium* L.), variety, Dagestan breeding varieties, introduced varieties, mineral compounds, sugars, titratable acids

Ученые Института питания Российской академии медицинских наук неоднократно сообщали о нарастающей проблеме нарушения микронутриентного пищевого статуса человека. В России к дефицитным в рационе питания относятся такие минеральные элементы, как кальций, магний, йод, железо и др. [1, 2]. Фрукты и ягоды – один из основных элементов правильного питания. Они характеризуются богатым и разнообразным химическим составом, включающим витамины, антиоксиданты, пектиновые и фенольные соединения, минеральные вещества и др. Эти пищевые компоненты нормализуют в организме

человека процессы метаболизма, замедляют старение клеток, нейтрализуют действие свободных радикалов [3, 4, 5]. Продукция из плодового сырья удовлетворяет суточную потребность человека в калии и кальции на 30 %, в магнии и железе – на 20%. Содержание минеральных веществ в плодах и ягодах варьирует от 0,5 до 1,5 % [1, 2].

В России, в соответствии с современными требованиями здорового питания, рекомендуемый годовой уровень потребления фруктов и ягод составляет 100 кг на одного человека (Приказ Минздрава России от 19 августа 2016 г. № 614 «Об утверждении рекомендаций по раци-

\* исследование выполнено при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Республики Дагестан» (тема FNMN-2022-0009, № государственной регистрации 122022400196-7).

ональным нормам потребления пищевых продуктов, отвечающих современным требованиям здорового питания» <https://docs.cntd.ru/document/420374878?ysclid=l8tkjllkzi870799052> ). По данным Росстата, в 2021 г. удовлетворение потребностей населения в нашей стране в такой продукции не превышало 63 %. Уровень самообеспечения фруктами и ягодами в России в 2021 г. составил 37,8 %. Их дефицит покрывали путем импорта, который был равен 6,4 млн т (*Сельское хозяйство в России. 2021: стат. сборник*, [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/S-X\\_2021.pdf](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/S-X_2021.pdf)). При этом в соответствии с Доктриной продовольственной безопасности РФ, утвержденной Указом Президента РФ от 21 января 2020 г. (<https://mcx.gov.ru/upload/iblock/f23/f239bc3c1f8283992797b-17cbe05443c.pdf?ysclid=l8tl2vvy4d232405755>), уровень самообеспечения фруктами и ягодами в России должен составлять не менее 60 %. Важное место в решении проблемы продовольственной безопасности и обеспечения населения страны качественной плодово-ягодной продукцией в необходимых объемах и ассортименте, позволяющем формировать комплексно сбалансированный рацион на уровне научно рекомендованных физиологических норм потребления пищевых веществ, занимают садоводство и пищевая промышленность [3].

Для успешного освоения инновационных технологий и производства качественной импортозамещающей плодовой продукции необходимо при селекции садовых культур, наряду со стрессоустойчивостью, скороплодностью и продуктивностью, обращать внимание на селекционные признаки, определяющие товарно-потребительские свойства плодов и их насыщенность жизненно необходимыми пищевыми веществами для использования в индустрии здорового и диетического питания [6, 7, 8].

Один из методов совершенствования сортамента садовых культур – интродукция сортов из других

эколого-географических условий [9, 10, 11]. Поэтому ученые Федерального аграрного научного центра Республики Дагестан (ФГБНУ ФАНЦ РД) уделяют большое внимание всестороннему изучению отечественных и зарубежных сортов, определению степени их адаптации к экологическим условиям предгорной зоны [9, 12, 13].

Особое место среди садовых культур в ряде стран мира занимает черешня (*Prunus avium* L.), которая пользуется большой популярностью среди производителей и потребителей за раннее созревание и высокую урожайность, непревзойденные вкусовые и питательные качества, а также высокие товарные показатели плодов [9, 14, 15]. По данным Минсельхозпрода Республики Дагестан, черешневые сады в регионе занимают примерно 1000 га, а валовой сбор продукции составляет 2,5...3,0 тыс. т в год. На сегодняшний день доля этой культуры среди других плодовых в республике составляет 11 % (<http://mcxrd.ru/news/item/4605>).

Существующие сорта черешни не всегда полностью реализуют свой биологический потенциал даже в самых благоприятных почвенно-климатических условиях юга России, в том числе в Дагестане. Наиболее частая причина снижения продуктивности и ухудшения качества плодов – невысокая устойчивость к различным стрессорам (гибель плодовых почек и распускающихся цветов, поражение коккомикозом, монилиозом и др.) [9, 10, 12].

Успешное решение селекционных задач по совершенствованию сортамента черешни неразрывно связано с комплексной оценкой биологического и генетического потенциала исходных форм по важнейшим селекционно-значимым признакам [10, 11, 16].

Цель исследования – выявление среди местного селекционного и интродуцированного сортамента черешни, выращиваемого в природно-климатических условиях предгорного Дагестана, сортообразцов,

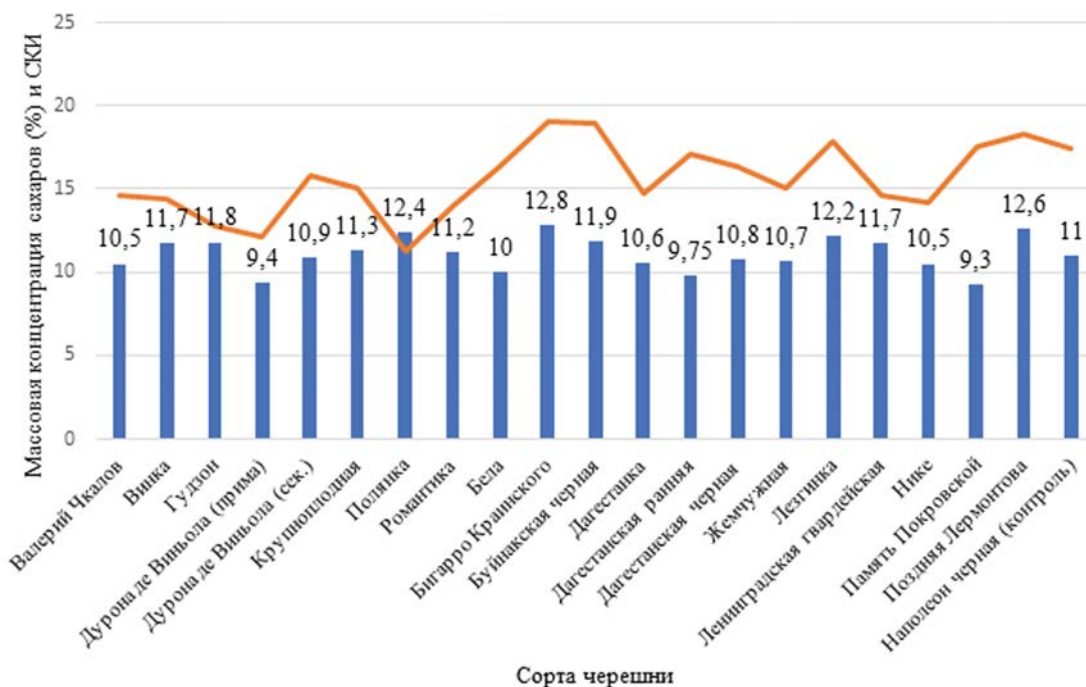


Рис. 1. Показатели сахарокислотного индекса и массовые концентрации сахаров в плодах сортов черешни в предгорной плодовой зоне Дагестана (среднее за 2020–2022 гг., стандартная ошибка среднего значения для массовой концентрации сахаров – 0,12...0,24 % (n=80)): ■ – массовая концентрация сахаров, %; — – сахарокислотный индекс.



отличающихся большим запасом ценных пищевых веществ, для дальнейшего использования в селекционной работе и в качестве потенциального сырья при проектировании специализированной конкурентоспособной пищевой продукции.

**Методика.** Объектами исследования служили плоды 12 местных селекционных и 8 интродуцированных сортов черешни, собранные по достижению потребительской зрелости в экспериментальных насаждениях ФГБНУ «Дагестанская селекционная опытная станция плодовых культур» (ФГБНУ ДСОСПК), расположенных в северно-предгорной зоне Дагестана (г. Буйнакск). Работу проводили в 2020–2022 гг. согласно общепринятой программе и методике сортоизучения плодовых культур [17]. Контролем служил сорт Наполеон черная, районированный в Дагестане, и отличающийся высокой продуктивностью, устойчивостью к стрессорам среды, а также хорошими товарно-потребительскими показателями качества плодов.

На опытных садовых участках проводили агротехнические мероприятия в соответствии с общепринятыми рекомендациями [17]. Почва под насаждениями темно-каштановая карбонатная среднесуглинистая с залеганием галечников на глубине 150...200 см. Мощность почвенного профиля составляет 60...70 см. Почвенно-поглощающий комплекс насыщен кальцием и магнием – 15,60...18,43 и 5,14...6,36 мг-экв./100 г соответственно (ГОСТ 26428). Содержание гумуса составляет 1,97...3,56 %, гидролизуемого азота (по Корнфилду) – 6,1...7,3 мг/100 г почвы, подвижного фосфора и калия (по Мачигину, ГОСТ 26205) – 1,80...2,23 и 25,2...28,4 мг/100 г почвы соответственно.

Климат в районе культивирования изучаемых сортов черешни умеренно-континентальный. Самым теплым месяцем в годы проведения исследований был июль, со среднемесячной температурой 21,7...24,4 °С, наиболее холодным – январь (-0,7...-1,4 °С). Среднегодная температура варьировала в пределах 10,7...11,2 °С. Насаждения расположены на территории, которая относится к зоне недостаточного увлажнения – 365...463 мм в год, разность между испарением (780 мм в год) и осадками восполняли вегетационными и влагозарядковыми поливами. Сумма активных температур в годы исследований (3360...3456 °С) оказывала благоприятное влияние на размеры и качество урожая черешни.

Общее содержание сахаров в плодах определяли по ГОСТ 8756.13-87, массовую концентрацию титруемых кислот – по ГОСТ ISO 750; количество натрия, калия, кальция и магния – методом капиллярного электрофореза с применением системы «Капель-105-М»; содержание фосфора – спектрофотометрическим ванадо-молибдатным методом по ГОСТ Р 51430-99; железа, цинка, меди, марганца и токсичных соединений (свинца, кадмия, мышьяка и ртути) – атомно-абсорбционным методом с использованием спектрометра с электротермической атомизацией МГА-915.

По массовой концентрации изучаемых компонентов в плодах сорта делили на три группы: по содержанию кислот – высокая – 2...7 %, средняя – 0,5...1,9 и низкая – 0,1...0,4 %; сахаров – высокая – 15...25, средняя – 7,0...14,9, низкая – 2,0...6,9 % [12].

С целью определения полезности черешни, по количеству содержащихся в ней минеральных веществ,

**Табл. 1. Содержание макроэлементов в плодах сортов черешни в предгорной плодовой зоне Дагестана (среднее за 2020–2022 гг.), мг% на сырую массу**

Сорт	Калий	Натрий	Кальций	Магний	Фосфор
<b>Интродуцированные сорта</b>					
Валерий Чкалов	240,3±3,1	16,6±0,3	14,2±0,3	12,6±0,3	51,5±0,9
Винка	177,8±2,7	48,9±0,6	35,6±0,6	21,2±0,4	37,3±0,7
Гудзон	312,5±5,7	19,0±0,4	26,6±0,5	16,3±0,3	53,3±1,1
Дурина де Виньола (прима)	80,6±1,2	14,9±0,3	10,0±0,2	7,7±0,1	43,0±0,8
Дурина де Виньола (сек.)	171,2±1,9	33,4±0,5	18,9±0,4	10,6±0,2	50,2±0,8
Крупноплодная	85,2±1,3	14,8±0,2	15,4±0,3	8,2±0,2	48,4±0,9
Полянка	125,0±2,4	22,7±0,6	12,0±0,2	9,8±0,1	41,0±0,6
Романтика	147,1±2,8	14,6±0,4	12,9±0,3	10,0±0,2	43,0±0,7
НСР <sub>05</sub>	57,3	8,7	6,3	3,3	4,2
<b>Сорта селекции ДСОСПК</b>					
Бела	189,1±3,2	16,1±0,4	15,3±0,3	13,7±0,2	33,0±0,7
Бигарро Краинского	187,8±2,8	11,7±0,3	14,3±0,2	9,5±0,1	27,0±0,5
Буйнакская черная	162,7±3,1	12,5±0,3	12,5±0,2	9,3±0,2	25,6±0,4
Дагестанка	122,0±1,2	14,8±0,4	13,8±0,3	12,6±0,3	42,8±0,8
Дагестанская ранняя	167,8±1,9	11,1±0,2	15,0±0,4	10,6±0,2	29,3±0,5
Дагестанская черная	184,3±1,8	16,3±0,5	29,1±0,6	19,2±0,3	32,5±0,7
Жемчужная	191,0±2,4	14,9±0,3	21,4±0,5	17,5±0,3	25,7±0,5
Лезгинка	202,4±3,3	21,5±0,5	20,2±0,5	20,3±0,4	30,2±0,6
Ленинградская гвардейская	170,0±3,0	17,4±0,4	13,0±0,4	8,6±0,2	46,0±0,9
Нике	184,2±2,8	9,4±0,2	13,2±0,3	9,6±0,3	27,0±0,4
Память Покровской	139,5±2,1	9,7±0,2	16,2±0,4	9,2±0,2	55,1±1,0
Поздняя Лермонтова	184,2±3,2	15,3±0,3	25,0±0,6	11,6±0,4	34,9±0,8
Наполеон черная (контроль)	174,7±2,1	15,5±0,2	18,6±0,4	14,8±0,4	29,2±0,5
НСР <sub>05</sub>	13,8	2,1	3,2	2,4	5,4
Среднее значение, X <sub>ср.</sub>	171,2	17,8	17,7	12,4	38,8
Коэффициент вариации, C <sub>v</sub> (%)	28,9	49,6	36,7	33,2	24,7
Рекомендуемая суточная норма, мг (МР 2.3.1.0253-21)	3500	1300	1000	420	700

**Табл. 2. Содержание микроэлементов в плодах сортов черешни в предгорной плодовой зоне Дагестана (среднее за 2020 – 2022 гг.), мг% на сырую массу**

Сорт	Железо	Марганец	Медь	Цинк
<b>Интродуцированные сорта</b>				
Валерий Чкалов	0,43	0,20	0,25	0,91
Винка	0,33	0,12	0,34	0,80
Гудзон	0,55	0,39	0,24	0,78
Дуруна де Виньола (прима)	0,19	0,17	0,08	0,34
Дуруна де Виньола (сек.)	1,02	0,31	0,36	0,49
Крупноплодная	0,95	0,28	0,31	0,56
Полянка	0,62	0,24	0,23	0,41
Романтика	0,35	0,25	0,15	0,43
НСР <sub>05</sub>	0,21	0,06	0,07	0,15
<b>Сорта селекции ДСОСПК</b>				
Бела	0,20	0,16	0,63	0,33
Бигарро Краинского	0,53	0,68	0,37	0,39
Буйнакская черная	0,25	0,30	0,41	0,57
Дагестанка	0,71	0,22	0,14	0,50
Дагестанская ранняя	0,26	0,57	0,58	0,42
Дагестанская черная	0,19	0,48	0,42	0,94
Жемчужная	0,36	0,14	0,61	0,31
Лезгинка	0,32	0,18	0,55	0,47
Ленинградская гвардейская	0,41	0,20	0,31	0,56
Нике	0,28	0,11	0,30	0,78
Память Покровской	0,26	0,21	0,13	0,50
Поздняя Лермонтова	0,23	0,46	0,28	0,92
Наполеон черная (контроль)	0,34	0,27	0,31	0,62
НСР <sub>05</sub>	0,09	0,11	0,10	0,13
Среднее значение, X <sub>ср.</sub>	0,42	0,28	0,33	0,54
Коэффициент вариации, C <sub>v</sub> (%)	55,8	53,7	47,0	36,3
Рекомендуемая суточная норма, мг (МР 2.3.1.0253-21)	10 (М*)/ 18 (Ж)	2	1	12

\*М – мужчины; Ж – женщины.

руководствуясь методическими рекомендациями МР 2.3.1.0253-21, была рассчитана степень удовлетворения суточной физиологической потребности организма взрослого человека в макро- и микроэлементах при употреблении 250 г плодов изучаемых сортов. Для проведения вычислений брали средние величины содержания пищевых веществ в исследованном сорimente черешни.

Статистическую обработку результатов исследований осуществляли методами математической статистики с использованием пакета программ SPSS 12.0 для Windows. Достоверность различий определяли с использованием t-критерия Стьюдента при  $p \leq 0,05$ .

**Результаты и обсуждение.** Учитывая, что химический состав фруктов и ягод различается в зависимости от сорта, места и условий выращивания, наши данные могут служить для ориентировочной оценки нутриентного профиля сортов черешни, возделываемых в условиях предгорной плодовой зоны промышленного садоводства Дагестана.

Для плодов черешни характерна невысокая кислотность. Согласно результатам исследований других авторов, концентрация титруемых кислот в плодах сортов черешни селекции ДСОСПК в среднем находится на уровне ягод, выращиваемых в других регионах [10, 18, 19]. Так, в наших экспериментах все изучаемые сорта черешни по содержанию титруемых кислот отнесены к

группе со средней кислотностью (0,5...1,9 %). Высокую величину этого показателя (0,80...1,10 %) среди исследованных интродуцентов отмечали у сортов Полянка, Гудзон, Винка и Романтика, в сортах селекции ФГБНУ ДСОСПК она варьировала от 0,53 (Память Покровской) до 0,80 % (Ленинградская гвардейская). Многие изученные генотипы, как интродуцированные, так и местные, по массовой концентрации титруемых кислот превзошли контрольный сорт Наполеон черная (0,63 %).

Отличительная особенность плодов черешни – ярко выраженный сладкий вкус, что обусловлено не только высоким содержанием сахаров, но и тем, что их фракционный состав представлен в основном фруктозой и глюкозой, и незначительным (не более 1 %) количеством сахарозы [19, 20].

Среди интродуцентов более высокое содержание сахаров (11,2...12,4 %), по сравнению с контрольным сортом Наполеон черная (11,0 %), отмечали в плодах сортов Полянка, Гудзон, Винка, Крупноплодная и Романтика, наименее сладким оказался сорт Дуруна де Виньола (прима) – 9,4 %. Лучшими по сахаристости, по сравнению с контролем, среди местных сортов оказались Бигарро Краинского (на 1,8 %), Поздняя Лермонтова (на 1,6 %) Лезгинка (на 1,2 %), Буйнакская черная (на 0,9 %) и Ленинградская Гвардейская (на 0,7 %) (рис. 1). Все исследованные сорта черешни, как интродуцированные, так и местные, отнесены к группе со средним содержанием сахаров (7,0...14,9 %) в плодах.

Хороший вкус плодов черешни обеспечивает оптимальное соотношение сахаров и кислот, которое характеризуют сахарокислотный индекс (СКИ). Наиболее высокими величинами этого показателя среди изученных интродуцированных сортов черешни отличались Дуруна де Виньола (сек.) – 15,8; Крупноплодная – 15,1 и Валерий Чкалов – 14,6 (см. рис. 1). Сорт Полянка характеризовался самым низким СКИ – 11,3. У местных сортов черешни он варьировал от 14,2 (Нике) до 19,1 (Бигарро Краинского). В исследованном сорimente черешни наиболее высокими показателями СКИ, по сравнению с контролем Наполеон черная (17,4), отличались сорта Бигарро Краинского (на 1,7), Буйнакская черная (на 1,5), Поздняя Лермонтова (на 0,9) и Лезгинка (на 0,5).

Биологическая изменчивость минеральных веществ в зависимости от вида плодовой культуры, природы элемента и его концентрации (более 0,1 %) в среднем достигает 26 %. При более низком содержании минерального элемента (до 0,1 %) коэффициент вариации равен 36...42 %. Вклад агротехнологических особенностей производства плодов и ягод может достигать 10 % [7].

В нашем исследовании плоды всех изучаемых сортов черешни были богаты калием. В плодах интродуцированных сортах его содержание находилось в пределах от 80,6 (Дуруна де Виньола (прима)) до 312,5 мг% (Гудзон). Среди местных селекционных сортов более высокой концентрацией калия (184,2...202,4 мг%), по сравнению с контрольным сортом Наполеон черная (174,7 мг%), характеризовались сорта Поздняя Лермонтова, Нике, Дагестанская черная, Бигарро Краинского, Бела, Жемчужная и Лезгинка (табл. 1).

Максимальное в опыте содержание кальция обнаружено в плодах сорта Винка – 35,6 мг%, что на 52,2 % больше, чем у контрольного сорта Наполеон черная (18,6 мг%). Близкие величины этого показателя отмечены у сортов Гудзон, Поздняя Лермонтова, Дагестанская черная, Жемчужная и Лезгинка, в ягодах которых среднее содержание этого минерального элемента составило 24,5 мг%. Массовая концентрация натрия в плодах интродуцентов варьировала от 14,6 (Роман-

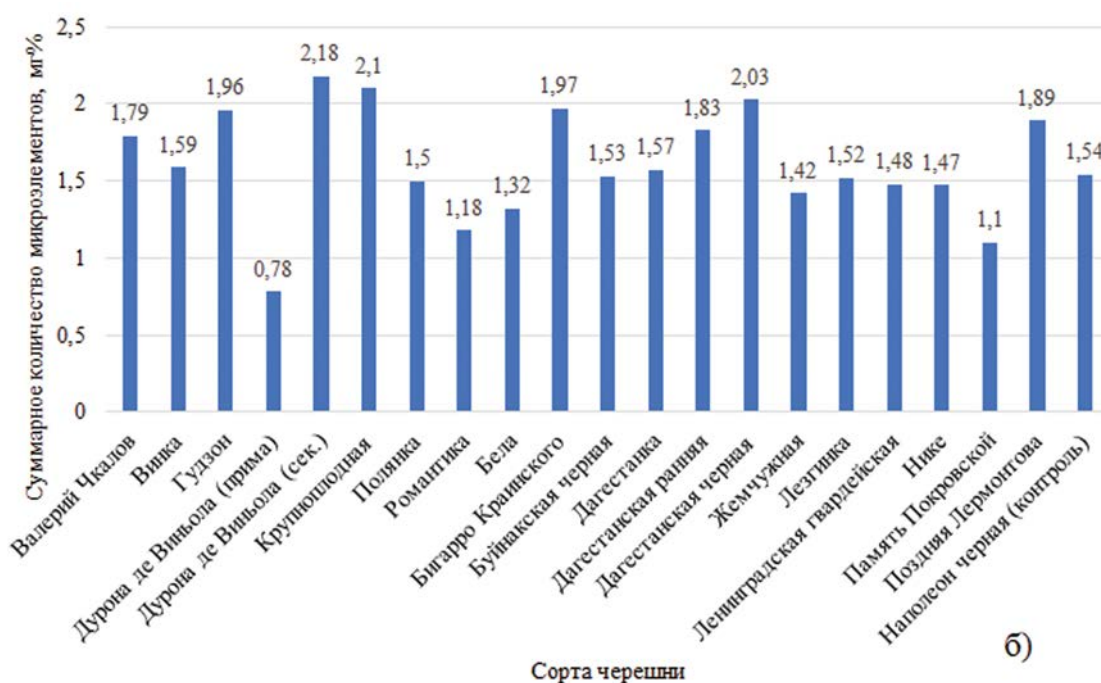
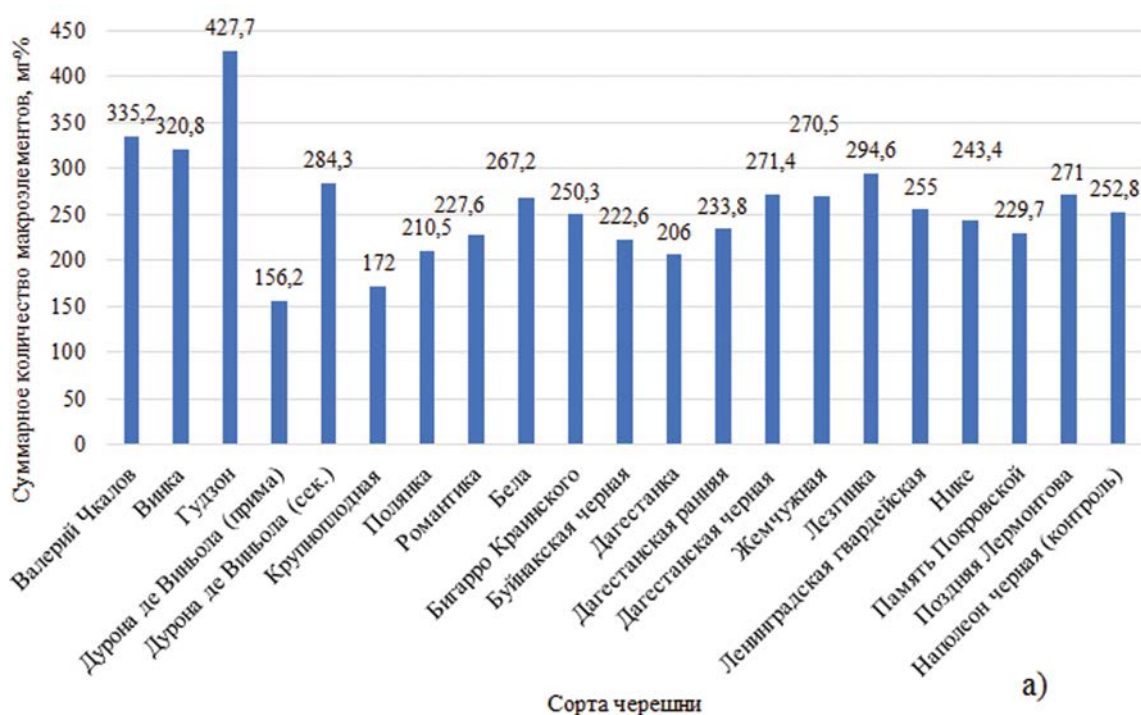


Рис. 2. Суммарное содержание макро- (а) и микроэлементов (б) в плодах черешни в предгорной плодовой зоне Дагестана (среднее за 2020–2022 гг.).

тика) до 48,9 мг% (Винка). Среди местных селекционных сортов превосходили контроль Наполеон черная (15,5 мг%) по величине этого показателя Лезгинка, Ленинградская гвардейская, Дагестанская черная и Бела.

Продукты растительного происхождения, как известно, содержат много магния и часто обеспечивают до 2/3 его поступления с пищей [2]. По количеству этого макроэлемента (16,3...21,2 мг%) в группе интродуцентов лидировали Гудзон и Винка, в группе местных сортов – Лезгинка и Дагестанская черная. Содержание магния в их плодах оказалось в среднем на 23,1 % больше, чем

у контрольного сорта Наполеон черная (14,8 мг%). Высокое содержание фосфора (50,2...55,1 мг%) отмечено в ягодах сортов Память Покровской, Валерий Чкалов, Гудзон и Дурона де Виньола (сек.).

Среди исследованного сортимента черешни наиболее богаты железом (0,71...1,02 мг%) были плоды сортов Дурона де Виньола (сек.), Крупноплодная и Дагестанка, в которых массовая концентрация этого элемента была больше, чем в контрольном сорте Наполеон черная (0,34 мг%), в среднем в 2,6 раза. Наименьшая величина этого показателя (0,19 мг%) определена в ягодах сортов



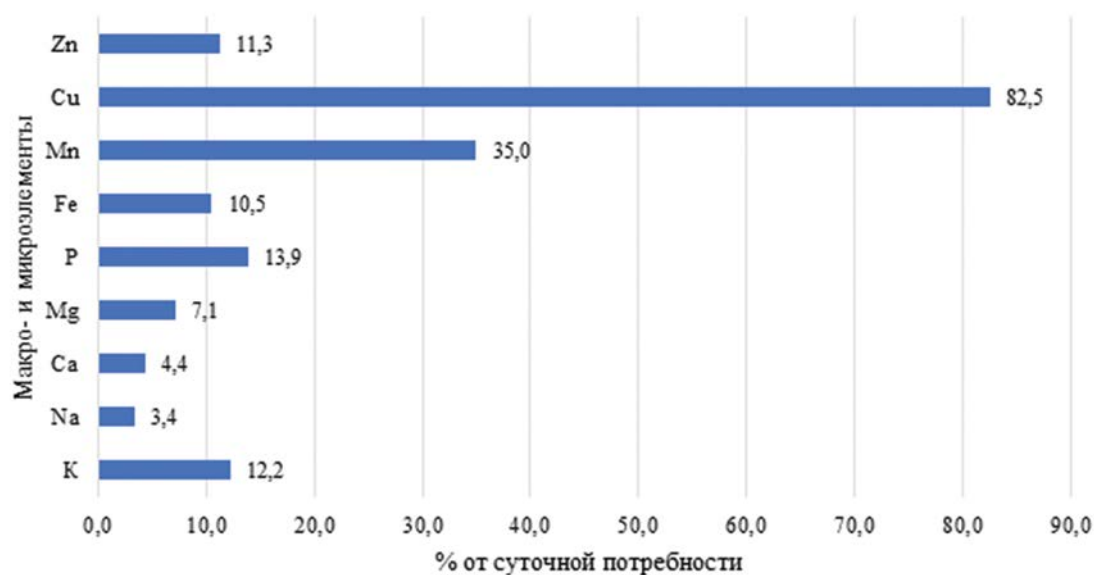


Рис. 3. Удовлетворение суточной потребности организма человека в макро- и микроэлементах при употреблении 250 г плодов исследованных сортов черешни (среднее по сортам).

Дуруна де Виньола (прима) и Дагестанская черная, что в 5,4 раза меньше, чем у сорта Дуруна де Виньола (сек.), отличившегося самым высоким содержанием этого минерального элемента (табл. 2). По количеству марганца первенство принадлежало сорту Бигарро Краинского, в плодах которого оно составило 0,68 мг%. Из исследованного сортимента черешни превзошли контрольный сорт Наполеон черная (0,27 мг%) по массовой концентрации марганца сорта интродуценты Крупноплодная, Дуруна де Виньола (сек.) и Гудзон, генотипы местной селекции Бигарро Краинского, Буйнакская черная, Дагестанская ранняя, Дагестанская черная и Поздняя Лермонтова. Наибольшие количества меди (0,63 мг%) и цинка (0,94 мг%) обнаружены в плодах черешни Бела и Дагестанская черная соответственно, что на 50,8 и 34,0 % больше, чем у контрольного сорта Наполеон черная. Самое низкое содержание меди (0,08 мг%) и цинка (0,31 мг%) выявлено соответственно в сортах Дуруна де Виньола (прима) и Жемчужная.

Массовая концентрация макро- и микроэлементов в исследованных сортах черешни, за исключением фосфора, сильно варьировала ( $C_v=29,8...55,8\%$ ). Разница в накоплении калия в плодах исследованного сортимента черешни в зависимости от сорта составляла 74,2 %; натрия – 80,8 %; кальция – 71,9 %; магния – 63,7 %; фосфора – 53,5 %; железа – 81,4 %; меди – 87,3 %; цинка – 67,0 %, а для марганца – 83,8 %.

Самым высоким суммарным запасом идентифицированных микроэлементов отличались плоды сорта Дуруна де Виньола (сек.) – 2,18 мг% (рис. 2), за ним следовали Крупноплодная (2,10 мг%) и Дагестанская черная (2,03 мг%). Большие количества макроэлементов были определены в ягодах сортов Гудзон (427,7 мг%), Валерий Чкалов (335,2 мг%) и Винка (320,8 мг%). Наименьший запас как макроэлементов (156,2 мг%), так и микроэлементов 0,78 мг% отмечен в плодах сорта Дуруна де Виньола (прима).

Содержание тяжелых металлов (свинца, кадмия, мышьяка и ртути) в плодах всех исследованных сортов не превышало предельно допустимых концентраций, установленных ТР ТС 021/2011. Это свидетельствует

о возможности их использования в качестве сырья при производства продуктов питания. Употребление 250 г черешни изученных сортов удовлетворяет суточную потребность организма человека (МР 2.3.1.0253-21) в меди на 82,5 %, в марганце – на 35,0 %, в калии, фосфоре, железе и цинке – в среднем на более чем 10 % (рис. 3).

**Выводы.** В природно-климатических условиях предгорной плодовой зоны Дагестана лучшими среди интродуцированных сортов черешни по массовой концентрации в плодах сахаров и кислот оказались Валерий Чкалов, Винка, Дуруна де Виньола (сек.), Крупноплодная и Романтика, у которых величина сахарокислотного индекса составляла 14,0...15,8. В группе местных селекционных сортов наилучшую способность к накоплению сахаров (11,7...12,8 %) и кислот (0,63...0,80 %) продемонстрировали сорта Бигарро Краинского, Буйнакская черная, Лезгинка, Ленинградская гвардейская и Поздняя Лермонтова, которые превзошли контрольный сорт Наполеон черная в среднем на 10,1 и 9,3 % соответственно. Наиболее значительным суммарным запасом микроэлементов (1,79...2,18 мг%) в исследованном сортименте, характеризовались сорта черешни Валерий Чкалов, Дуруна де Виньола (сек.), Гудзон, Крупноплодная, Бигарро Краинского, Дагестанская ранняя, Дагестанская черная и Поздняя Лермонтова. Наибольшее суммарное содержание макроэлементов отмечено в плодах сортов Гудзон (427,7 мг%), Валерий Чкалов (335,2 мг%), Винка (320,8 мг%), Дуруна де Виньола (сек.) (284,3 мг%), Лезгинка (294,6 мг%), Дагестанская черная (271,4 мг%) и Поздняя Лермонтова (271,0 мг%) при величине этого показателя в контроле 252,8 мг%.

В целом, наиболее перспективные сорта черешни, плоды которых отличаются высокой концентрацией минеральных веществ, сахаров и кислот – Валерий Чкалов, Винка, Дуруна де Виньола (сек.), Гудзон, Крупноплодная, Бигарро Краинского, Дагестанская черная, Лезгинка и Поздняя Лермонтова. Они могут быть использованы в селекционной работе с целью оптимизации промышленного сортимента и обеспечения населения страны высококачественной продукцией.

**Литература.**

1. Спиричев В. Б., Шатнюк Л. Н., Позняковский В. М. Обогащение пищевых продуктов витаминами и минеральными веществами. Наука и технологии / под общ. ред. В. Б. Спиричева. 2-е изд., стер. Новосибирск : Сиб. унив. изд-во, 2005. 548 с.
2. Микронутриенты в питании здорового и больного человека / В. А. Тутельян, В. Б. Спиричев, Б. П. Суханов и др. М. : Колос, 2002. 424 с.
3. Биологическая ценность плодов и ягод российского производства / М. Ю. Акимов, В. В. Бессонов, В. М. Коденцова и др. // Вопросы питания. 2020. Т. 89. № 4. С. 220–232. doi: 10.24411/0042-8833-2020-10055.
4. Гусейнова Б. М. Пищевая ценность дикорастущих плодов из горного Дагестана и ее сохранность после быстро замораживания и холодового хранения // Вопросы питания. 2016. Т. 85. № 4. С. 76–81.
5. Минеральный состав и показатели безопасности яблок различных сортов, выращиваемых в Южном Казахстане / М. Б. Кенжеханова, Л. А. Мамаева, С. С. Ветухин и др. // Известия вузов. Пищевая технология. 2021. №5-6. С. 12–14. doi: 10.26297/0579-3009.2021.5-6.2.
6. Dickerson R.N. Metabolic support challenges with obesity during critical illness // Nutrition. 2019. Vol. 57. P. 24–31. doi: 10.1016/j.nut.2018.05.008.
7. Sarkar P., Thirumurugan K. Modulatory functions of bioactive fruits, vegetables and spices in adipogenesis and angiogenesis // J. Funct. Foods. 2019. Vol. 53. P. 318–336. doi: 10.1016/j.jff.2018.12.036.
8. Papadaki A., Sanchez-Villegas A., Sanchez-Tainta A. Fruits and vegetables, The Prevention of Cardiovascular Disease through the Mediterranean Diet. London: Academic Press, 2018. P. 101–109. doi: 10.1016/B978-0-12-811259-5.00006-8.
9. Гусейнова Б. М., Абдулгамидов М. Д., Мусаева Р. Т. Товарно-потребительские показатели качества и хозяйственно-ценные признаки интродуцированных сортов черешни разных сроков созревания, культивируемых в предгорной плодовой зоне Дагестана // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17. № S2 (66). С. 14–21. doi: 10.12737/2073-0462-2022-12-19.
10. Алехина Е. М. Формирование перспективного промышленного сортимента черешни для южной зоны садоводства // Садоводство и виноградарство. 2017. № 4. С. 15–21.
11. Результаты селекции косточковых культур в условиях юга России / Р. Ш. Заремук, Е. М. Алехина, С. В. Богатырева и др. // Российская сельскохозяйственная наука. 2017. № 3. С. 10–13.
12. Гусейнова Б. М., Абдулгамидов М. Д. Технические и биохимические показатели качества селекционных сортов и гибридных форм черешни в условиях Дагестана // Таврический вестник аграрной науки. 2022. № 4(32). С. 47–61.
13. Алибеков Т. Б. Мобилизация и использование генетических ресурсов плодовых Дагестана для решения важнейших задач садоводства республики // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2014. №27 (3). С. 30–41.
14. Phenolic compound composition and antioxidant activity of fruits of Rubus and Prunus species from Croatia / L. Jakobek, M. Seruga, B. Seruga, et al. // International Journal of Food Science and Technology. 2009. Vol. 44. P. 860–868.
15. Identification of bioactive response in traditional cherries from Portugal / A. T. Serra, R. O. Duarte, B. R. Maria, et al. // Food Chemistry. 2011. Vol. 125. P. 318–325.
16. Берлова Т. Н. Степень изученности вопроса хозяйственно-ценных признаков черешни // Бюллетень ГНБС. 2020. Вып. 137. С. 112–117. doi: 10.36305/053-1634-2020-137-112-117.
17. Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур / под ред. Е. Н. Седова Орел: Издательство Всероссийского НИИ селекции плодовых культур, 1999. 608 с.
18. Сравнительный анализ химического состава плодов вишни и черешни различных сортов, выращенных в Самарской области / Т. О. Быкова, С. А. Алексашина, А. В. Демидова и др. // Известия вузов. Пищевая технология. 2017. № 1. С. 32–35.
19. Заремук Р. Ш., Доля Ю. А. Конкурентоспособные сорта черешни для садоводства Краснодарского края // Садоводство и виноградарство. 2021. № 3. С. 29–35. doi: 10.31676/0235-2591-2021-3-29-35.
20. Павел А. Р., Макаркина М. А. Формирование некоторых компонентов химического состава плодов яблони под влиянием факторов среды // Вестник аграрной науки. 2020. № 6 (87). С. 18–24. doi: HYPERLINK "https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2020.6.18"10.17238/issn2587-666X.2020.6.18.

Поступила в редакцию 08.11.2022  
 После доработки 09.12.2022  
 Принята к публикации 10.01.2023

## ХАРАКТЕРИСТИКА ПОПУЛЯЦИЙ *Pyrenophora tritici-repentis*, *Parastagonospora nodorum* И *Parastagonospora pseudonodorum* НА ТЕРРИТОРИИ ТАМБОВСКОЙ ОБЛАСТИ ПО НАЛИЧИЮ ГЕНОВ-ЭФФЕКТОРОВ\*

Н.М. Коваленко<sup>1</sup>, кандидат биологических наук, Ю.В. Зеленева<sup>1</sup>, доктор биологических наук, В.П. Судникова<sup>2</sup>, кандидат сельскохозяйственных наук

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений,  
196608, Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, 3  
E-mail: info@vizr.spb.ru

<sup>2</sup>Среднерусский филиал Федерального научного центра им. И. В. Мичурина,  
392553, Тамбовская обл., Тамбовский р-н., пос. Новая Жизнь, ул. Молодежная, 1  
E-mail: tmsnifs@mail.ru

Исследования проводили с целью характеристики популяций *Pyrenophora tritici-repentis*, *Parastagonospora nodorum* и *Parastagonospora pseudonodorum* на территории Тамбовской области на наличие генов-эффекторов *Tox1*, *Tox3*, *ToxA* и *ToxB* с использованием связанных с ними молекулярных маркеров. Инфекционные образцы отобраны в 2022 г. с листьев яровой и озимой пшеницы, выращенной на участке, расположенном в северо-восточной части Центрально-Черноземного региона. Предшественник – чистый пар. Виды *P. nodorum* и *P. pseudonodorum* отмечены на сортах яровой пшеницы в конце вегетации растений. Гриб *P. tritici-repentis* порастил сорта как озимой, так и яровой пшеницы. С использованием молекулярных маркеров, проведена идентификация генов, кодирующих NEs у 68 изолятов гриба *P. tritici-repentis* с 19 сортов озимой пшеницы, 100 изолятов вида *P. nodorum* с 10 сортов яровой пшеницы и 70 изолятов *P. pseudonodorum* с 7 сортов яровой пшеницы. Среди изученных изолятов *P. nodorum* отмечены как единичные гены *Tox1*, *Tox3* и *ToxA*, так и сочетания по два гена в одном генотипе. В генотипе изолятов *P. pseudonodorum* не отмечено присутствие гена *ToxA*. Выявлены изоляты грибов, генотипы которых несут *Tox1* и/или *Tox3*. Ген *ToxB* в изученной популяции *P. tritici-repentis* не выявлен, тогда как *ToxA* был широко представлен. Встречаемость в популяции *P. nodorum* генов *ToxA* составила 30 %, *Tox1* – 20 %, *Tox3* – 30 %; в популяции *P. pseudonodorum* отмечали *Tox1* – 57,1 % и *Tox3* – 30 %; в популяции *P. tritici-repentis* был представлен *ToxA* – 76,5 %. Штаммы *P. tritici-repentis*, *P. nodorum* и *P. pseudonodorum*, охарактеризованные по наличию генов-эффекторов, будут использованы при создании искусственных инфекционных фонов для выявления источников и доноров устойчивости к листовым пятнистостям.

## CHARACTERIZATION OF *Pyrenophora tritici-repentis*, *Parastagonospora nodorum* AND *Parastagonospora pseudonodorum* POPULATIONS BASED ON THE PRESENCE OF EFFECTOR GENES IN THE TAMBOV OBLAST TERRITORY

N.M. Kovalenko<sup>1</sup>, Yu.V. Zeleneva<sup>1</sup>, V.P. Sudnikova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>All-Russian Institute of Plant Protection,  
196608, Sankt-Peterburg, Pushkin, sh. Podbel'skogo, 3  
E-mail: info@vizr.spb.ru

<sup>2</sup>Central Russian branch of Michurin Federal Scientific Center,  
392553, Tambovskaya obl., Tambovskii r-n, pos. Novaya Zhizn', ul. Molodezhnaya, 1  
E-mail: tmsnifs@mail.ru

The aim of the research is to characterise the populations of *Pyrenophora tritici-repentis*, *Parastagonospora nodorum* and *Parastagonospora pseudonodorum* in the territory of the Tambov region based on the presence/absence of the *Tox1*, *Tox3*, *ToxA* and *ToxB* effector genes using their associated molecular markers. Infectious samples were obtained in 2022 from the leaves of spring and winter wheat. The infectious site is located in the northeastern part of the Central Black Soil region. The predecessor is represented by the pure steam. The species of *P. nodorum* and *P. pseudonodorum* were observed on spring wheat cultivars in the end of their vegetation period. The fungus of *P. tritici-repentis* affected the cultivars of both winter and spring wheat. Using molecular markers, the genes encoding NEs were identified in 68 *P. tritici-repentis* isolates obtained from 19 winter wheat cultivars, 100 *P. nodorum* isolates, taken from 10 spring wheat cultivars, and 70 *P. pseudonodorum* isolates, provided by 7 spring wheat cultivars. Among the *P. nodorum* isolates studied, there were both single genes *Tox1*, *Tox3*, and *ToxA*, as well as combinations of two genes in one genotype. The presence of the *ToxA* gene was not found in the genotype of *P. pseudonodorum* isolates. Fungal isolates with genotypes carrying *Tox1* and/or *Tox3* have been identified. The *ToxB* gene was not found in the examined population of *P. tritici-repentis*, while *ToxA* was widely represented. The occurrence of genes in the *P. nodorum* population was as follows: *ToxA*, 30%; *Tox1*, 20%; *Tox3*, 30%; in the population of *P. pseudonodorum* it was: *Tox1* - 57.1%, *Tox3* – 30 %; in the population of *P. tritici-repentis* the ratio was represented by the following figures: *ToxA* - 76.5%. *P. tritici-repentis*, *P. nodorum*, and *P. pseudonodorum* strains, characterized by the presence of effector genes, will be used to create artificial infectious backgrounds to identify sources and donors of leaf spot resistance.

**Ключевые слова:** вирулентность, гены-эффекторы, пиренофороз, ПЦР-диагностика, пшеница, пятнистости, септориоз, фитопатогенные грибы.

**Key words:** virulence, effector genes, pyrenophorosis, PCR-diagnostics, wheat, spots, septoriosis, phytopathogenic fungi.

Результаты ежегодного мониторинга болезней пшеницы свидетельствуют, что в последние годы на территории Тамбовской области, как и во многих

регионах России, все большее распространение получают септориозные и пиренофорозные пятнистости [1].

Виды *Parastagonospora nodorum* (Berk.) Quaedvl.,

\* работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 19-76-30005.



Verkley & Crous и *Parastagonospora pseudonodorum* (синоним *P. avenae* f. sp. triticea) [2] вызывают септориоз листа и колоса пшеницы. По нашим наблюдениям, они образуют некротические пятна с пикнидами на листьях, побегах и колосе, как правило, начиная с фазы колошения (51 по шкале Цадокс) [3]. *P. nodorum* и *P. pseudonodorum* считают одними из наиболее вредоносных фитопатогенов во всех зернопроизводящих странах [4]. *P. nodorum* имеет широкий круг хозяев. Кроме пшеницы, он поражает рожь, тритикале, ячмень, дикие злаки. Вид *P. pseudonodorum* поражает только пшеницу.

Гриб *Pyrenophora tritici-repentis* (Died.) Drechsler вызывает желтую пятнистость пшеницы. Это одна из наиболее вредоносных болезней культуры, которая встречается во всех районах возделывания пшеницы по всему миру [5, 6, 7]. Первичные симптомы заболевания отмечают весной на озимой пшенице в виде мелких желто-коричневых пятен, которые увеличиваются, принимая линзообразную форму [8]. Помимо пшеницы, гриб может поражать множество других злаков, таких как рожь, ячмень и пырей ползучий [9, 10].

Грибы *P. tritici-repentis*, *P. nodorum* и *P. pseudonodorum* известны своей способностью синтезировать некротрофные эффекторы (necrotrophic effectors – NEs), в том числе специфичные к хозяину токсины (host selective toxins – HSTs), которые функционируют как факторы патогенности [11]. У вида *P. tritici-repentis* описаны три некротрофных эффектора – *Ptr ToxA*, *Ptr ToxB* и *Ptr ToxC*. При этом ученые отмечают, что NEs существует больше [12, 13, 14]. *Ptr ToxA* и *Ptr ToxB* – белки, *Ptr ToxC* – низкомолекулярное соединение небелковой природы [13]. *Ptr ToxA* вызывает некроз, *Ptr ToxB* и *Ptr ToxC* – хлороз [11, 12]. *Ptr ToxA* кодирует одна единственная копия гена *ToxA*, тогда как *Ptr ToxB* – многокопийный ген *ToxB* [15]. *Ptr* также имеет гомолог *Ptr ToxB*, кодируемый геном *toxh*, который не вызывает никаких симптомов у пшеницы, несмотря на 81 % сходства с *Ptr ToxB* [16, 17].

У вида *P. nodorum* идентифицировано восемь генов, кодирующих NEs, комплементарных девяти генам чувствительности пшеницы (*Snn*) – *SnToxA/Tsn1*, *SnTox1/Snn1*, *SnTox2/Snn2*, *SnTox3/Snn3-B1/Snn3-D1*, *SnTox4/Snn4*, *SnTox5/Snn5*, *SnTox6/Snn6* и *SnTox7/Snn7* [18]. Изначально предполагали, что *SnTox2*, *SnTox6* и *SnTox7* – три разных NEs, нацеленных на три отдельных гена чувствительности хозяина. Richards с коллегами [19] показали, что на самом деле они кодируют один и тот же ген, который обозначили как *Tox267*. Этот ген нацелен на три отдельных гена чувствительности хозяина – *Snn2*, *Snn6* и *Snn7*. На сегодняшний день клонированы четыре некротрофных эффекторных гена *P. nodorum* – *ToxA*, *Tox1*, *Tox3* и *Tox267*. Показано, что они также характерны и для вида *P. pseudonodorum* [20].

Знание разнообразия *Ptr* может помочь улучшить идентификацию патогенов и возможность борьбы с ними, а также создавать новые сорта пшеницы, которые будут обладать устойчивостью к местной популяции возбудителей болезней [21].

Цель исследований – охарактеризовать популяции *Pyrenophora tritici-repentis*, *Parastagonospora nodorum* и *Parastagonospora pseudonodorum* на территории Тамбовской области на наличие у них генов-эффекторов *Tox1*, *Tox3*, *ToxA* и *ToxB* с использованием связанных с ними молекулярных маркеров.

**Методика.** Материалом для исследования служили моноклональные изоляты *P. tritici-repentis*, *P. nodorum* и *P. pseudonodorum* (табл. 1), выделенные в 2022 г. из пораженных листьев пшеницы, собранных на территории Тамбовской области (инфекционный участок

**Табл. 1. Происхождение изолятов *P. tritici-repentis*, *P. nodorum* и *P. pseudonodorum***

Сорт (озимая пшеница)	Число изолятов	Сорт (яровая пшеница)	Число изолятов	Регистрационный номер
<i>Pyrenophora tritici-repentis</i>		<i>Parastagonospora nodorum</i>		
Безенчукская 380	2	Валентина	10	175-22-Р.п.
Бирюза	4	Воевода	10	185-22-Р.п.
Звонница	6	Курская 2038	10	137-22-Р.п.
Изюминка	4	Л 400	10	156-22-Р.п.
Инна	4	Л 503	10	157-22-Р.п.
Косовица	4	Пирамида	10	149-22-Р.п.
Лагуна	4	Саратовская 29	10	145-22-Р.п.
Латыневка	2	Союз 1	10	148-22-Р.п.
Липецкая звезда	4	Тулайковская 100	10	150-22-Р.п.
Льговская 167	2	Фаворит	10	161-22-Р.п.
Льговская 4	4	Итого	100	-
Мироновская 100	4	<i>Parastagonospora pseudonodorum</i>		
Мироновская 808	6	Краснокутка 10	10	136-22-Р.п.
Московская 39	2	Кинельская 6	10	134-22-Р.п.
Московская 40	2	Тулайковская 100	10	150-22-Р.п.
Престиж	4	Фаворит	10	161-22-Р.п.
Проза	2	Экада 109	10	163-22-Р.п.
Синтетик	4	Воевода	10	185-22-Р.п.
Спартак	4	Гранни	10	186-22-Р.п.
Итого	68	Итого	70	-

Среднерусского филиала Федерального научного центра им. И. В. Мичурина).

Инфекционный участок расположен в северо-восточной части Центрально-Черноземного региона. Почва опытного участка, на котором собирали инфекционный материал, характеризовалась следующими показателями: содержание в пахотном слое (0...30 см) подвижного фосфора – 22,0 мг/100 г почвы, подвижного калия – 10,9 мг/100 г почвы (по Чирикову, ГОСТ 26204–91), реакция почвенного раствора (рН<sub>сол.</sub>) – 5,5 ед. (ГОСТ 26483–85), гидролитическая кислотность – 3,9 мг-экв./100 г почвы (по Каппену, ГОСТ 26212–91), сумма поглощенных оснований – 57,2 ммоль/100 г почвы (ГОСТ 26483–85).

Учетная площадь делянки 10 м<sup>2</sup>, повторность четырехкратная. Посев проводили сеялкой СФК, норма высева 5 млн всхожих семян на 1 га. Агротехника выращивания культуры общепринятая в Тамбовской области. Предшественник – чистый пар.

Погодные условия 2022 г. были неблагоприятными для возделывания сельскохозяйственных растений и развития на них фитопатогенов микозной этиологии (табл. 2). В начале вегетационного периода за май выпало 34,4 мм осадков, и при умеренных температурах воздуха гидротермический коэффициент (ГТК) находился на достаточно высоком уровне – 1,41. В июне количество осадков (23,4 мм) и ГТК (0,40) были низкими. В июле выпало 98,2 мм осадков, что значительно выше нормы, а гидротермический коэффициент составил 1,54. Это способствовало росту и развитию сельскохозяйственных растений. В августе осадков выпало мало – 22,0 мм,

Табл. 2. Метеорологические условия 2022 г. (Тамбовская метеостанция)

Фактор погоды	Декада	Месяц				
		апрель	май	июнь	июль	август
Среднесуточная температура воздуха по декадам, °С	I	6,2	8,7	17,9	21,4	22,5
	II	10,9	11,2	19,5	20,2	22,0
	III	11,0	12,2	20,6	20,1	25,5
Средняя температура за месяц, °С	-	9,3	10,7	19,4	20,5	22,6
Сумма осадков по декадам, мм	I	32,6	5,0	11,3	1,3	0,0
	II	10,3	18,9	7,1	49,8	22,0
	III	8,0	10,5	5,0	47,1	0,0
Сумма осадков за месяц, мм	-	50,9	34,4	23,4	98,2	22,0
Гидротермический коэффициент (ГТК) за месяц	-	-	1,41	0,40	1,54	0,31

произошло повышенные температуры воздуха – максимальную температуру воздуха больше или равную 30 °С отмечали 17 дней. Величина гидротермического коэффициента за этот – 0,31 свидетельствует о засушливых условиях. Урожайность изучаемых культур в 2022 г. оказалась ниже уровня 2020 г., но выше 2021 г. [1].

Погодные факторы оказали влияние и на развитие возбудителей болезней. Так, характерные некротические пятна с пикнидами *P. nodorum* и *P. pseudonodorum* были зарегистрированы только на сортах яровой пшеницы в конце вегетации растений, что позволило в условиях лаборатории выделить грибок в чистую культуру [22]. Результаты лабораторной диагностики видов грибов были подтверждены методом секвенирования с использованием оборудования ЦКП «Геномные технологии, протеомика и клеточная биология» ФГБНУ ВНИИСХМ».

Грибок *P. tritici-repentis* отмечали на сортах озимой и яровой пшеницы. При этом озимая пшеница в условиях года поражалась сильнее яровой, поэтому в анализ были включены изоляты с сортов этой разновидности. Выделение и размножение культуры гриба *P. tritici-repentis* выполняли по методике Л. А. Михайловой с соавторами [8].

Изоляты выращивали в чашках Петри на питательной среде в течение 7...10 дней в термостате при 21...22 °С. Геномную ДНК грибов выделяли из чистой культуры моноконидиальных изолятов стандартным методом СТАВ/хлороформ [23]. Амплификацию геномной ДНК проводили в 25 мкл реакционной смеси (67 мМ Трис-НСl pH 8,8; 3мМ MgCl<sub>2</sub>; по 200 мкМ каждого dNTP; 10 рМ/мл праймера; 25 (от 2 до 50) нг геномной ДНК и 0,5 ед. Таq-полимеразы). Амплифицированные фрагменты разделяли методом электрофореза в 2%-ном агарозном геле, в 1×TBE буфере (pH 8,2), гель окрашивали бромистым этидием. Для оценки размера фрагментов использовали ДНК маркер Step 100 plus (Биолабмикс).

Скрининг изолятов *P. nodorum* и *P. pseudonodorum* на присутствие генов *Tox1* и *Tox3* проводили по

методике Gao et al. [24] с использованием ПЦП с парами праймеров *SnTox1-cF/SnTox1-cR* и *SnTox3-cF/SnTox3-cR* соответственно (табл. 3). Условия ПЦП: 94 °С в течение 4 мин., затем 30 циклов – 94 °С в течение 30 с, 60 °С – 30 с, 72 °С – 3 мин.; последний этап элонгации – 72 °С в течение 10 мин.

*ToxA* у изолятов трёх видов детектировали с методом ПЦП с использованием праймеров для связывания ORF *ToxA TA51F* и *TA52R* [25]. Условия ПЦП: 94 °С в течение 3 мин., затем 30 циклов – 94 °С в течение 30 с, 58 °С – 30 с, 72 °С – 30 с; последний этап удлинения – 72 °С в течение 7 мин.

Идентификацию гена *ToxB* проводили с помощью ПЦП с двумя парами геноспецифических праймеров: *TB10/TB12* [16, 26] и *TB57/TB6* [15, 16]. Условия ПЦП (*TB10/TB12*): 95 °С в течение 2 мин., затем 35 циклов – 95 °С в течение 15 с, 57 °С – 15 с, 72 °С – 1 мин.; последний этап – 72 °С в течение 10 мин. Условия ПЦП (*TB57/TB6*): 94 °С в течение 3 мин.; затем 30 циклов – 94 °С в течение 30 с, 58 °С – 30 с, 72 °С – 30 с; последний этап – 72 °С в течение 7 мин.

В качестве положительного контроля для редко встречаемого у изолятов гриба гена *ToxB* использовали изоляты греческого происхождения из коллекции лаборатории иммунитета растений к болезням Всероссийского научно-исследовательского института защиты растений, которые стабильно дают четкие продукты амплификации с праймерами на ген *ToxB* [27].

**Результаты и обсуждение.** В результате молекулярного скрининга у изучаемого материала (238 ДНК-проб, полученных от 100 моноконидиальных изолятов вида *P. nodorum*, 70 – *P. pseudonodorum*, 68 – *P. tritici-repentis*) были выявлены как единичные гены, кодирующие *NEs*, так и их сочетания в одном генотипе.

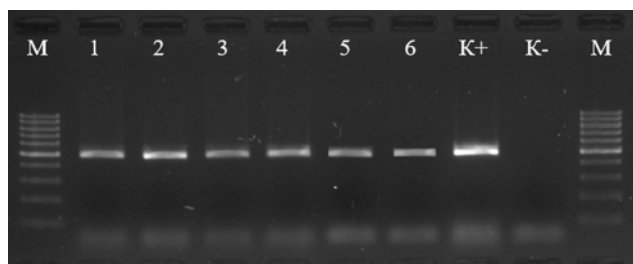
Ген *Tox1* выявлен среди изолятов с 6 сортов яровой пшеницы. Его наличие отмечено у изолятов *P. nodorum* с сортообразцов Курская 2038 (номер изолята 137-22-Р.н.) и Тулайковская 100 (150-22-Р.н.),

Табл. 3. Список праймеров, использованных для выявления маркеров генов *Tox1*, *Tox3*, *ToxA*, *ToxB*

Название праймера	Последовательность 5'-3'	Ссылка на литературный источник	Размер диагностического фрагмента, п.н.
<i>SnTox1-c</i>	F: ATGAAGCTTACTATGGTCTTGT R: TGTGGCAGCTAACTAGCACA	[24]	500
<i>SnTox3-c</i>	F: CTCGAACCACGTGGACCCGGA R: CTCCTCCGTTGGGATTGCCCATATG		600
<i>TA51/52</i>	F: GCGTTCTATCCTCGTACTTC R: GCATTCTCCAATTTTCACG	[25]	573
<i>TB10/TB12</i>	F: TATGCGACCCTAACCTAGCC R: GCCAGATAAAAAACCCSTATACC	[16, 26]	646
<i>TB57/TB6</i>	F: GAGACTGCTATGCTACTTGCTG R: ACGTCTCCACTTTGCACACTCTC	[15, 16]	243

а также моноконидиальных изолятов *P. pseudonodorum*, выделенных с инфекционного материала сортов яровой пшеницы Краснокутка 10 (136-22-Р.п.), Кинельская 6 (134-22-Р.п.), Тулайковская 100 (150-22-Р.п.) и Экада 109 (163-22-Р.п.) (рис. 1).

Наличие гена *Tox3* отмечено среди изолятов вида

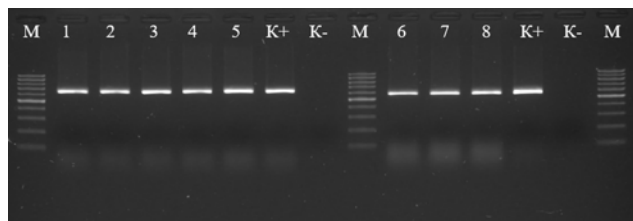


**Рис. 1.** Продукты амплификации с праймерами *SnTox1-cF/SnTox1-cR*, специфичными для гена *Tox1*, номера изолятов: 1) 137-22-Р.п.; 2) 150-22-Р.п.; 3) 136-22-Р.п.; 4) 134-22-Р.п.; 5) 150-22-Р.п.; 6) 163-22-Р.п.; М – ДНК маркер *Step100 plus*; К+ изолят 32-21-Р.п.; К- изолят 29-21-Р.п. Размер диагностического фрагмента 500 п.н.

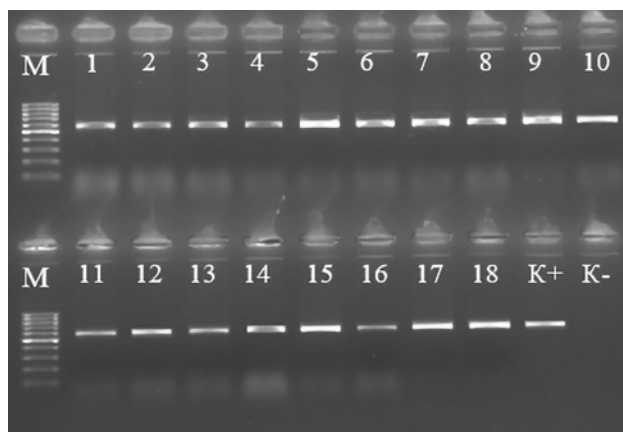
*P. nodorum*, полученных из растительных образцов сортов Курская 2038 (137-22-Р.п.), Союз 1 (148-22-Р.п.) и Воевода (185-22-Р.п.), а также *P. Pseudonodorum* с сортов Экада 109 (163-22-Р.п.) и Воевода (185-22-Р.п.) (рис. 2).

Ген *ToxA* присутствует в геноме *P. nodorum*, *P. pseudonodorum*, а также *P. tritici-repentis*. Вследствие разницы в количестве полиморфизмов по *ToxA* среди изолятов *P. nodorum* и *P. tritici-repentis* (13 и 3 гаплотипа соответственно), было сделано предположение, что *P. nodorum* служит донором гена *ToxA* для *P. tritici-repentis* [25]. В нашем исследовании он был выявлен среди изолятов *P. nodorum* с трех сортов яровой пшеницы: Союз 1 (148-22-Р.п.), Пирамида (149-22-Р.п.) и Воевода (185-22-Р.п.) (см. рис. 2, 3). В генотипе изолятов *P. pseudonodorum* в 2022 г. ген *ToxA* не выявлен, в 2021 г. он был выявлен в генотипе изолятов вида *P. pseudonodorum* из листьев сорта яровой мягкой пшеницы Воронежская 20 (101-21-Р.п.) [3].

В результате молекулярного скрининга ген *ToxA* выявлен среди изолятов вида *P. tritici-repentis*, полученных из листьев 18 сортов озимой мягкой пшеницы, находящихся в испытании (рис. 3). Два изолята гриба с сорта Московская 40 не несли в своем генотипе ген *ToxA* (рис. 4).

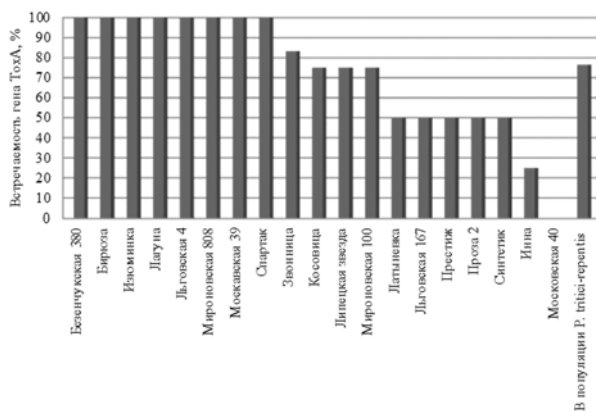


**Рис. 2.** Продукты амплификации ПЦР с праймерами *SnTox3-cF/SnTox3-cR*, специфичными для гена *Tox3*, номера изолятов: 1) 137-22-Р.п.; 2) 148-22-Р.п.; 3) 185-22-Р.п.; 4) 163-22-Р.п.; 5) 185-22-Р.п.; М – ДНК маркер *Step100 plus*; К+ изолят 32-21-Р.п.; К- изолят 2-21-Р.п.-1. Размер диагностического фрагмента – 600 п.н. Продукты амплификации с праймерами *TA51 F/TA52 R*, специфичными для гена *ToxA*, номера изолятов: 6) 148-22-Р.п.; 7) 149-22-Р.п.; 8) 185-22-Р.п. К+ изолят 29-21-Р.п.; К- изолят 26-21-Р.п. Размер диагностического фрагмента – 573 п.н.



**Рис. 3.** Продукты амплификации с праймерами *TA51 F/TA52 R*, специфичными для гена *ToxA* в изолятах тамбовской популяции *P. tritici-repentis*, пробы соответствуют изолятам, полученным со следующих сортов озимой мягкой пшеницы: 1) Безенчукская 380, 2) Бирюза, 3) Изюминка, 4) Лагуна, 5) Льговская 4, 6) Мироновская 808, 7) Московская 39, 8) Спартак, 9) Звонница, 10) Косовица, 11) Липецкая Звезда, 12) Мироновская 100, 13) Латышевка, 14) Льговская 167, 15) Престиж, 16) Проза 2, 17) Синтетик, 18) Инна; М – ДНК маркер *Step100 plus*; К+ изолят 29-21-Р.п.; К- изолят 26-21-Р.п. Размер диагностического фрагмента: 573 п.н.

Таким образом, в 2022 г. среди изученных изолятов встречаемость гена *ToxA*, кодирующего *NEs*, в Тамбовской популяции вида *P. nodorum* составила 30 %, *Tox1* – 20 %, *Tox3* – 30 %; гена *Tox1* в популяции *P. Pseudonodorum* – 57,1 %, *Tox3* – 30 %; гена *ToxA* в популяции *P. tritici-repentis* – 76,5 % (рис. 5).



**Рис. 4.** Встречаемость гена *ToxA* в изолятах тамбовской популяции *P. tritici-repentis*, в % (всего проанализировано 68 моноконидиальных изолятов).

Ген *ToxB* не обнаружен в изученной популяции *P. tritici-repentis*. При этом при использовании пар праймеров ТВ10/ТВ12 и ТВ57/ТВ6 получены четкие продукты амплификации соответствующих размеров у положительных контролей греческого происхождения. Такие результаты согласуются с публикациями ряда авторов, которые сообщают об отсутствии гена *ToxB* и широкой представленности гена *ToxA* в генотипах изолятов *P. tritici-repentis* из российских популяций. Так, ген *ToxB* не был обнаружен в коллекцию изолятов *P. tritici-repentis* из южных, северных и западносибирских регионов РФ, Финляндии и Казахстана, сформированной в 2017–2018 гг. [27, 28, 29]. Отсутствие или



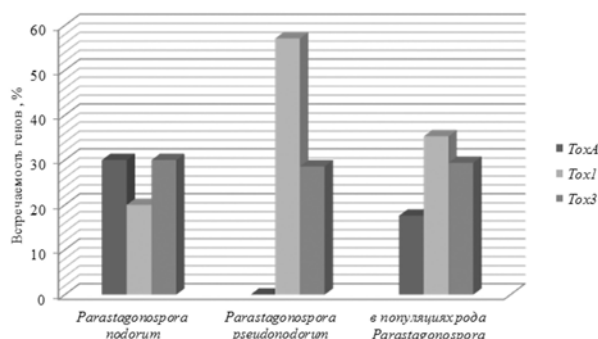


Рис. 5. Встречаемость генов ToxA, Tox1 Tox3 в генотипах изолятов тамбовских популяций *Parastagonospora* spp, %.

редкая встречаемость изолятов, продуцирующих этот токсин, была отмечена и в других странах [30, 31]. Представленность гена *ToxA* у изученных образцов популяций *P. tritici-repentis* варьирует. Так, в российской северокавказской и казахстанской юго-восточной популяциях частота изолятов с геном *ToxA* составляла 100 %, а в других варьировала от 5,5 % (западносибирская омская популяция) до 66 % (финская популяция) [28].

**Выводы.** В результате идентификации генов, кодирующих NEs, у грибов *P. tritici-repentis*, *P. nodorum* и *P. pseudonodorum*, проведенной в 2022 г. на территории Тамбовской области ЦЧР, установлено, что генотипы изолятов гриба *P. nodorum*, находившихся в изучении, содержат гены *ToxA* (частота встречаемости 30 %), *Tox1* (20 %) и *Tox3* (30 %), *P. pseudonodorum* – *Tox1* (57,1 %) и *Tox3* (30 %); генотипы изолятов гриба *P. tritici-repentis* характеризуются наличием гена *ToxA* (76,5 %) и отсутствием – *Tox* B.

Результаты проведенных исследований будут полезны при составлении селекционных программ и проведении защитных мероприятий сельскохозяйственных растений.

#### Литература.

1. Обзор фитосанитарного состояния посевов сельскохозяйственных культур в Тамбовской области в 2021 году и прогноз развития вредных организмов в 2022 году / сост. Н. П. Сдвижков, О. И. Илларионова, М. В. Савенкова и др. Тамбов: ООО «Издательский дом «Тамбов», 2022. 134 с.
2. Genome-scale phylogenies reveal relationships among *Parastagonospora* species infecting domesticated and wild grasses / D. Croll, P. W. Crous, D. Pereira et al. // *Persoonia*. 2021. Vol. 46. P. 116–128. doi: 10.3767/persoonia.2021.46.04.
3. Видовой состав возбудителей септориозов пшеницы в европейской части России и идентификация генов-эффекторов *SnToxA*, *SnTox1* и *SnTox3* / Ю. В. Зеленева, И. Б. Аблова, В. П. Судникова и др. // *Микология и фитопатология*. 2022. Т. 56. № 6. С. 441–447. doi: 10.31857/S0026364822060113.
4. Novel sources of resistance to *Septoria nodorum* blotch in the Vavilov wheat collection identified by genome-wide association studies / H.T.T. Phan, K. Rybak, S. Bertazzoni et al. // *Theor Appl Genet*. 2018. Vol. 131, P. 1223–1238. doi: 10.1007/s00122-018-3073-y.
5. *Pyrenophora tritici-repentis*: a plant pathogenic fungus with global impact. In: *Genomics of plant-associated fungi: monocot pathogens* / Ciuffetti L. M., Manning V. A., Pandelova I. et al. / Dean RA, Lichens-Park A, Kole C (eds). Berlin: Springer, 2014. P. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-44053-7\\_1](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-44053-7_1)

- (дата обращения: 03.03.2023). doi: 10.1007/978-3-662-44053-7\_1.
6. Impact of crop rotation and soil tillage on the severity of winter wheat leaf blotches / B. Bankina, G. Bimsteine, I. Arhipova et al. // *Rural Sustain Res*. 2021. Vol. 45. No. 340. P. 21–27. doi: org/10.2478/plua-2021-0004.
7. Ким Ю. С., Волкова Г. В. Желтая пятнистость листьев пшеницы: распространение, вредоносность, расовый состав (обзор) // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020. № 2 (50). С. 105–116. doi: 10.18286/1816-4501-2020-2-105-116.
8. Михайлова Л. А., Мироненко Н. В., Коваленко Н. М. Желтая пятнистость пшеницы. Методические указания по изучению возбудителя желтой пятнистости *Pyrenophora tritici-repentis* и устойчивости сортов., СПб: ВИЗР, 2012. 64 с.
9. Vistas of tan spot research / E. D. de Wolf, R. J. Effertz, S. Ali, et al. // *Can J Plant Pathol*. 1998. Vol. 20. No. 4. P. 349–370. doi: 10.1080/07060669809500404.
10. Ali S., Francl L. J. Population race structure of *Pyrenophora tritici-repentis*. Prevalent on wheat and noncereal grasses in the great plains // *Plant Dis*. 2003. Vol. 87. No. 4. P. 418–422. doi: 10.1094/pdis.2003.87.4.418.
11. Ciuffetti L. M., Tuori R. P., Gaventa J. M. A single gene encodes a selective toxin causal to the development of tan spot of wheat // *Plant Cell*. 1997. Vol. 9. Np. 2. P. 135–144. doi: 10.1105/tpc.9.2.135.
12. Strelkov S. E., Lamari L., Ballance G. M. Characterization of a host-specific protein toxin (Ptr ToxB) from *Pyrenophora tritici-repentis* // *Mol Plant-Microbe Interact*. 1999. Vol. 12. No. 8. P. 728–732. doi: 10.1094/MPMI.1999.12.8.728.
13. Identification of a chlorosis-inducing toxin from *Pyrenophora tritici-repentis* and the chromosomal location of an insensitivity locus in wheat / R. J. Effertz, S. W. Meinhardt, J. Anderson, et al. // *Phytopathology*. 2002. Vol. 92. No. 5. P. 527–533. doi: 10.1094/PHYTO.2002.92.5.527.
14. Phenotypical and genotypical characterization of *Pyrenophora tritici-repentis* races in Brazil / V. V. Bertagnolli, J. R. Ferreira, Z. Liu, et al. // *Eur J Plant Pathol*. 2019. Vol. 154. No. 4. P. 995–1007. doi: 10.1016/j.fgb.2017.10.004.
15. Characterization of the ToxB gene from *Pyrenophora tritici-repentis* / J. P. Martinez, S. A. Ottum, S. Ali, et al. // *Mol Plant-Microbe Interact*. 2001. Vol. 14. No. 5. P. 675–677. doi: 10.1094/MPMI.2001.14.5.675.
16. Martinez J. P., Oesch N. W., Ciuffetti L. M. Characterization of the multiple-copy host-selective toxin gene, ToxB, in pathogenic and nonpathogenic isolates of *Pyrenophora tritici-repentis* // *Mol. Plant-Microbe Interact*. 2004. Vol. 17. P. 467–474. doi: 10.1094/MPMI.2004.17.5.467.
17. Kim Y. M., Strelkov S. Heterologous expression and activity of Ptr ToxB from virulent and avirulent isolates of *Pyrenophora tritici-repentis* // *Can J Plant Pathol*. 2007. Vol. 29. No. 3. P. 232–242. doi: 10.1080/07060660709507465.
18. Duba A., Goriewa-Duba K., Wachowska U. A review of the interactions between wheat and wheat pathogens: *Zymoseptoria tritici*, *Fusarium* spp. and *Parastagonospora nodorum* // *Int. J. Mol. Sci*. 2018. Vol. 19. Article 1138. URL: <https://www.mdpi.com/1422-0067/19/4/1138>. (дата обращения: 03.03.2023). doi: 10.3390/ijms19041138.
19. A triple threat: the *Parastagonospora nodorum* SnTox267 effector exploits three distinct host genetic

- factors to cause disease in wheat / Richards J. K., Kariyawasam G. K., Seneviratne S., et al. // *New Phytol.* 2022. Vol. 233. No. 1. P. 427–442. doi: 10.1111/nph.17601.
20. Friesen T. L., Faris J. D. Characterization of Effector-Target Interactions in Necrotrophic Pathosystems Reveals Trends and Variation in Host Manipulation // *Annu Rev Phytopathol.* 2021. Vol. 59. P. 77–98. doi: 10.1146/annurev-phyto-120320-012807.
21. Diversity in morphotypes and necrotrophic effectors (Nes) of *Pyrenophora tritici-repentis* strains in Latvia and Belarus / J. Kaņeps, I. Morocko-Bicevska, B. Bankina, et al. // *Cereal research communications.* 2022. Vol. 50. P. 1037–1043. doi: 10.1007/s42976-022-00255-4.
22. Коломиец Т. М., Пахолкова Е. В., Дубовая Л. П. Отбор исходного материала для создания сортов пшеницы с длительной устойчивостью к септориозу. М.: Печатный город, 2017. 56 с.
23. Doyle J. J., Doyle J. L. Isolation of plant DNA from fresh tissue // *Focus.* 1990. Vol. 12. P. 13–15.
24. Identification and characterization of the SnTox6-Snn6 interaction in the *Parastagonospora nodorum* – wheat pathosystem / Y. Gao, J. D. Faris, Z. Liu, et al. // *Mol. Plant Microbe Interact.* 2015. Vol. 28. P. 615–625. doi: 10.1094/MPMI-12-14-0396-R.
25. Andrie R. M., Pandelova I., Ciuffetti L. M. A combination of phenotypic and genotypic characterization strengthens *Pyrenophora tritici-repentis* race identification // *Phytopathology.* 2007. Vol. 97. P. 694–701. doi: 10.1094/PHYTO-97-6-0694.
26. Ubiquity of ToxA and absence of ToxB in Australian populations of *Pyrenophora tritici-repentis* / E. A. Antoni, K. Rybak, M. P. Tucker et al. // *Australasian Plant Pathology.* 2010. P. 39. P. 63–68. doi: 10.1071/AP09056.
27. Мироненко Н. В., Орина А. С., Коваленко Н. М. Генетический полиморфизм ядер штаммов *Pyrenophora tritici-repentis* по генам-эффекторам ToxA и ToxB // *Генетика.* 2021. Т. 57. № 5. С. 528–535. doi: 10.31857/S0016675821040093.
28. Частота гена ToxA в популяциях *Pyrenophora tritici-repentis* на Северном Кавказе и северо-западе России / Н. В. Мироненко, О. А. Баранова, Н. М. Коваленко и др. // *Микология и фитопатология.* 2015. Т. 49. № 5. С. 325–329.
29. Мироненко Н. В., Коваленко Н. М., Баранова О. А. Характеристика географически отдаленных популяций *Pyrenophora tritici-repentis* по вирулентности и генам токсинообразования ToxA и ToxB // *Вестник защиты растений.* 2019. № 1 (99).

Поступила в редакцию 23.01.2023

После доработки 16.02.2023

Принята к публикации 09.03.2023

## О ВЛИЯНИИ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА РОСТ УРОЖАЙНОСТИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В РОССИИ\*

И.Ю. Савин, академик РАН, доктор сельскохозяйственных наук

Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт им. В.В. Докучаева»,  
119017, Москва, Пыжевский пер., 7 стр. 2б

Российский университет дружбы народов,  
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6  
E-mail: savin\_iyu@esoil.ru

*В последние годы в России отмечают постоянный рост урожайности зерновых культур. В качестве его причины часто рассматривается позитивный тренд метеорологических условий, но веских научных доказательств этому практически не приводится. Цель исследований – анализ изменений потенциальной (климатической) урожайности зерновых в стране за период с 2000 по 2022 гг. Для достижения поставленной цели использовали имитационную модель роста растений WOFOST, которая позволяет оценить воздействие всех метеорологических параметров комплексно. Оценку проводили для сети из 42 репрезентативных точек в разных регионах страны с учетом ежедневных метеорологических параметров и типа почв. Моделирование осуществляли на уровне потенциальной урожайности, при котором учитывается варьирование только метеорологических параметров и считается, что влияние других факторов на урожайность отсутствует. Тренды потенциальной урожайности имеют различную направленность в разных регионах страны. Тренд в сторону более благоприятных для зерновых культур метеорологических условий отмечен для Северного Кавказа, в Нижнем Поволжье, в Западной Сибири и на Дальнем Востоке, в то время как в Центральном и Центрально-Черноземном округах, Верхнем Поволжье, а также на юге Средней Сибири в последние годы отмечено падение потенциальной урожайности. В целом рост урожайности зерновых в последние годы хорошо согласуется с трендом изменения агрометеорологических условий в большинстве зернопроизводящих регионов страны. Односторонние тренды метеорологически потенциальной и статистической урожайности отсутствуют лишь в регионах центра Европейской части России, где роль климатического фактора в варьировании урожайности зерновых менее значима, и где можно предположить эффект мер, предпринимаемых правительством, по поддержке и развитию сельского хозяйства.*

## ON THE IMPACT OF MODERN CLIMATE CHANGE ON THE INCREASE OF GRAIN YIELDS IN RUSSIA

I.Yu. Savin

Federal Research Center «Dokuchaev Soil Science Institute»,  
119017, Moskva, Pyzhevskii per., 7, str. 2b

Peoples' Friendship University of Russia,  
117198, Moskva, ul. Miklukho-Maklaya, 6  
E-mail: savin\_iyu@esoil.ru

*In recent years, Russia has seen a steady increase in grain crop yields. A positive trend in meteorological conditions is often considered as the reason for this phenomenon, but there is almost no strong scientific evidence for it. The aim of investigation was to analyze changes in the potential (climatic) grain yields in the country for the period from 2000 to 2022. For this purpose, the simulation model of plant growth WOFOST was used, which allows assessing the impact of all meteorological parameters in a comprehensive manner. The assessment was carried out for a network of representative points (42 points) in different regions of the country for grain crops, taking into account daily meteorological parameters and soil type. Modeling was conducted at the level of potential yield, which takes into account the variation of meteorological parameters only, and it is believed that the limiting influence of other factors on the yield is absent. As a result of the analysis, it was found that the trends of potential yields have different direction in different regions of the country. The trend towards more favorable meteorological conditions for grain crops is observed for the North Caucasus, the lower Volga region, Western Siberia and the Far East, while in the Central and Central Black Earth districts, the upper Volga region, as well as in the south of Central Siberia in recent years there is a drop in the potential yields. The growth of grain yields in recent years agrees well with the trend of changes in agrometeorological conditions in most grain-producing regions of the country. Unidirectional trends in meteorological potential and statistical yields are absent only in the regions of central European Russia, where the role of the climatic factor in grain yield fluctuations is less significant, and where one can assume the effect of measures taken by the government of the country to support and develop agriculture.*

**Ключевые слова:** урожайность зерновых, многолетний тренд агрометеорологических условий, Россия, имитационное моделирование, WOFOST.

**Key words:** grain yields, long-term trend of agrometeorological conditions, Russia, simulation modeling, WOFOST.

От объемов продукции сельского хозяйства, производимых на территории страны во многом зависит как ситуация с продовольственной безопасностью, так и экспортный потенциал. Возможности

самообеспечения продовольствием на любой территории предопределяются спецификой питания населения и особенностями природных условий. Специфика климата и широкое распространение

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российской Федерации (соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2022-321 от 21 апреля 2022 г.).



плодородных почв в России создают благоприятные условия для производства зерновых культур, которые служат основой питания населения и кормовой базой для развития животноводства.

На протяжении многих лет Россия занимает одно из первых мест в мире по производству зерна. Но это обусловлено в основном большими площадями посевов зерновых культур. Их урожайность, по сравнению со странами Европы, США или Австралией, остается на достаточно низком уровне [1]. Кроме того, урожайность зерновых в России достаточно нестабильна и сильно варьирует от года к году [2]. Это чаще всего объясняется периодическими засухами, но оказывают влияние и такие факторы, как заморозки посевов, неблагоприятные погодные условия во время уборки или перезимовки озимых культур, недостаточное внесение удобрений и др. [3].

Несмотря на существующую нестабильность, в последние годы отмечается значительный положительный тренд урожайности на уровне страны. Некоторые авторы связывают его преимущественно с действиями органов исполнительной власти, направленными на стимулирование развития сельского хозяйства и его модернизацию [4]. Другие исследователи указывают на ведущую роль происходящих изменений климата [2, 5]. Без сомнения, на рост урожайности оказывает влияние большой набор факторов, включая упомянутые, и выделить воздействие какого-либо из них представляется достаточно сложной задачей. Поэтому, по-видимому, до сих пор научная оценка вклада каждого из основных факторов в рост урожайности зерновых в России не проведена.

Цель исследований – оценка вклада изменения метеорологических условий в рост урожайности зерновых в России с использованием подходов имитационного моделирования роста сельскохозяйственных растений.

**Методика.** В качестве объекта исследований выступают статистические данные Госкомстата России

по урожайности зерновых культур на уровне отдельных субъектов Российской Федерации (<https://www.fedstat.ru/indicator/31533.do>). Анализировали параметры «Урожайность зерновых культур в хозяйствах всех категорий на убранную площадь» и «Валовой сбор зерновых культур в хозяйствах всех категорий» для периода с 2000 по 2022 гг.

Все регионы России ранжировали по средней многолетней величине валового сбора. Затем в каждом из регионов, валовой сбор в которых в сумме превысил 90% от величины этого показателя по всей стране, была выбрана репрезентативная точка на пахотных угодьях с преобладающим типом почв. Для этого использовали Карту распаханности почв России [6] и данные Единого государственного реестра почвенных ресурсов России [7]. Всего таким образом для анализа были выбраны 42 точки.

Для каждой точки отображали ежедневные метеорологические параметры, необходимые для моделирования роста растений за период с 2000 по 2022 гг. (количество солнечной радиации, давление водяного пара, суточные минимальная и максимальная температуры воздуха, средняя дневная скорость ветра, суточное количество атмосферных осадков). Информацию получали из базы данных проекта POWER NASA (США) [8]. Все данные адаптировали к модели WOFOST 7.1 [9], которую использовали для моделирования потенциальной урожайности. Моделирование осуществляли для пшеницы и ячменя. Для этого использовали файлы этих растений, а также файлы с параметрами преобладающих в каждой точке почв, откалиброванными для этой модели ранее [10].

Модель WOFOST широко используют для моделирования потенциальной урожайности различных сельскохозяйственных культур в мире [9] и России [10, 11]. На ее основе возможно получение данных на трех иерархических уровнях, которые можно условно назвать климатическая потенциальная урожайность

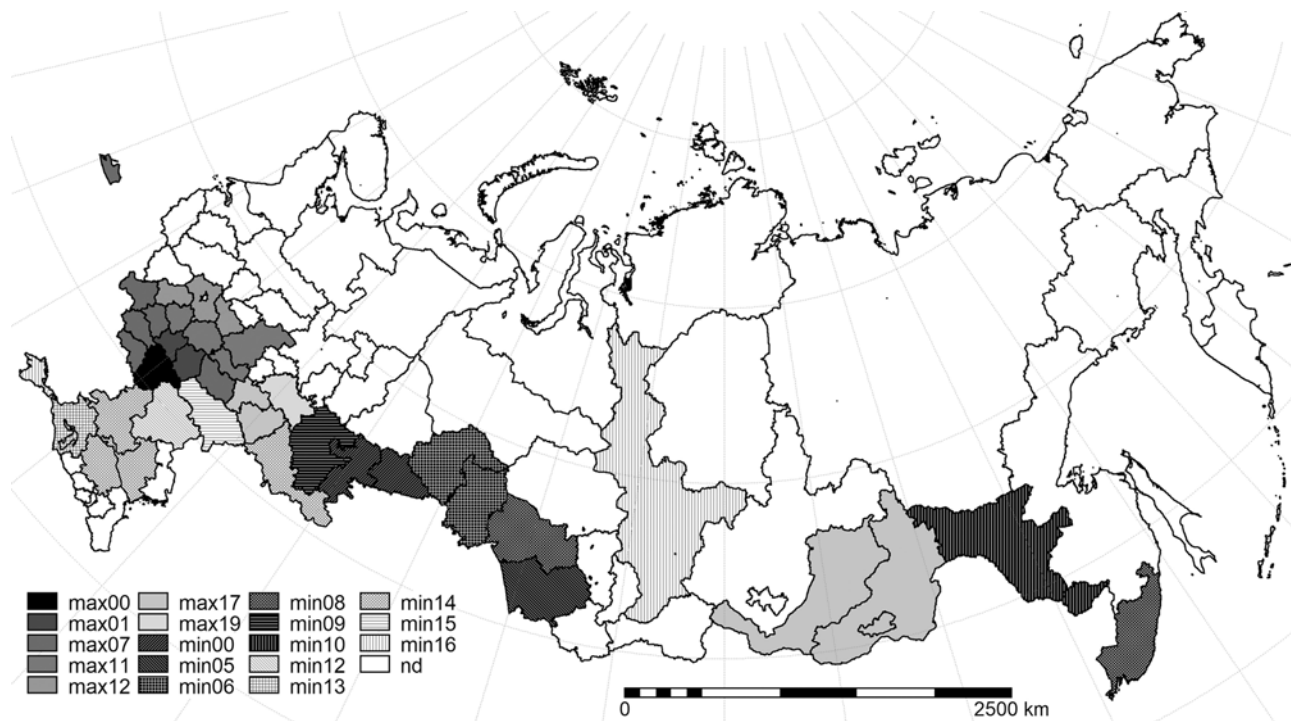


Рис. 1. Тренды потенциальной урожайности ячменя в разрезе регионов России: max, min – годы максимума (минимума) потенциальной урожайности; nd – моделирование не проводили.

(1 уровень), водно-ограниченная потенциальная урожайность (2 уровень) и ограниченная питательными элементами урожайность (3 уровень). На первом уровне учитываются только такие параметры как приход солнечной радиации и температурные условия. Все остальные считаются оптимальными. На втором учитываются все метеопараметры, а также почвенно-гидрологические свойства (условия увлажнения) и считается, что с доступностью питательных веществ для растений нет ограничений. На третьем уровне учитывается содержание питательных веществ, но не принимаются во внимание возможные болезни и вредители посевов [9]. В нашей работе, для оценки вклада метеорологических факторов, моделирование проводили на втором уровне.

В качестве индикатора климатически потенциальной урожайности использовали выходной параметр модели TAGP (максимальное годовое количество надземной фитомассы), который выступает более надежным для решения поставленной задачи, чем параметр TWSO (масса зерна).

В процессе исследований осуществляли сравнение результатов моделирования для пшеницы и ячменя и в случае их сильного расхождения в какой-либо точке, проводили анализ его причин и повторное моделирование. Если расхождение устранить не удавалось, то точку моделирования заменяли на другую в том же регионе. После подобного анализа результаты моделирования были представлены в виде кривых многолетних значений TAGP, для которых в Excel определяли тренд, а также сравнивали этот тренд с трендом урожайности для каждого из анализируемых регионов по статистическим данным. Тренд для каждого временного ряда был представлен полиномом второго порядка.

Результаты анализа представлены в виде пространственных картограмм с использованием пакета ГИС ILWIS v.3.3 (<https://www.itc.nl/ilwis/>).

**Результаты и обсуждение.** Результаты моделирования для пшеницы и ярового ячменя оказались очень близки. Отдельные отклонения были незначительными и не изменяли специфики многолетней линии тренда для обоих видов растений. Такие результаты ожидаемы и не противоречат знаниям о близости физиологии и фенологии рассматриваемых культур [12]. Это дало основание для использования в дальнейшем только результатов для ячменя.

В ходе исследования выделено несколько типов многолетних трендов (при использовании полиномиальной функции второго порядка):

- постепенный рост кривой с 2000 по 2022 гг.;
- постепенное падение кривой с 2000 по 2022 гг.;
- минимум кривой в середине рассматриваемого временного промежутка с разными датами минимума;
- максимум кривой в середине рассматриваемого временного промежутка с разными датами максимума.

То есть, тенденция к росту благоприятности метеорологических условий за последние годы анализируемого периода характерна для трендов типа 1 и 3. А для трендов типа 2 и 4 свойственна тенденция к ухудшению метеорологических условий.

Согласно результатам моделирования в Центральном и Центрально-Черноземном округах, Верхнем Поволжье, а также на юге Средней Сибири в последние годы отмечено падение потенциальной урожайности (рис. 1). То есть, метеорологические условия в этих регионах в целом становятся менее благоприятными для зерновых. Одновременно, рост потенциальной урожайности в последние годы отмечен на Северном Кавказе, в Нижнем Поволжье, Западной Сибири и на Дальнем Востоке, что



**Рис. 2.** Сравнение многолетнего тренда результатов моделирования потенциальной урожайности и статистических данных в разрезе регионов России: серый цвет – тренды разнонаправленные, штриховка – тренды одинаправленные, белый цвет – моделирование не проводили.



свидетельствует о тренде к улучшению метеорологических условий для зерновых в этих регионах.

Сравнение кривых потенциальной и статистической урожайности для разных регионов России показало, что они часто не совпадают, что может быть связано со многими причинами. Поэтому было проведено сравнение только на уровне многолетних трендов (рис. 2). Его результаты свидетельствуют, что для большей части основной земледельческой зоны России, за исключением Центрального и Центрально-Черноземного районов, а также регионов Верхней Волги, тренды имеют одинаковую направленность. Это подтверждает выводы авторов, предполагающих, что основным драйвером роста урожайности в России в последние годы выступает изменение климата [2, 4]. Но такие результаты были получены только на уровне анализа направленности трендов. Выполнить его на уровне прямых корреляций результатов моделирования со статистической урожайностью на основе использованного метода невозможно. Это связано с рядом причин, среди которых наиболее весомыми представляются следующие:

схематичность моделирования. Его осуществляли только для двух культур и только на одном типе (хоть и преобладающем) почв. Кроме того, блок моделирования условий перезимовки озимых культур в модели практически отсутствует, а озимые культуры в ряде регионов занимают большие площади. В качестве индикатора динамичности потенциальной урожайности в модели использовали величину надземной фитомассы, что также выступает значительным допущением;

погрешность статистических данных неизвестна, и их качество всегда выступает объектом критики практически во всех странах мира [13]. Более того, статистическая урожайность в Госкомстате России представляется расчетной, а не измеряемой величиной [14];

влияние может оказывать и качество использованных метеорологических данных, которые выступают результатом глобального моделирования состояния атмосферы. Их выборочная проверка на территории России показала хорошее совпадение с данными метеостанций в части температурных условий и меньшую точность в случае конвективных осадков.

Несовпадение по направленности трендов между результатом моделирования и статистическими данными в Центральном, Центрально-Черноземном районах и Верхнем Поволжье скорее всего связано с более интенсивным ведением хозяйства в этих регионах и менее выраженной зависимостью урожайности зерновых от метеорологических условий, в том числе меньшим воздействием на урожайность засушливых явлений [3].

Кроме того, необходимо учитывать, что климатически потенциальная урожайность во многих регионах превышает реальную [11]. В этих случаях ее межгодное варьирование в гораздо большей степени зависит не от метеорологических условий, а от других факторов.

В целом полученные результаты подтверждают предположение ряда авторов о том, что отмечаемые изменения климата благоприятно отразятся на сельском хозяйстве России [15]. Но, скорее всего это будет происходить только на первых порах. Сдвиг климатических зон на север приведет к тому, что территории с оптимальными метеоусловиями окажутся на неоптимальных почвах, которые на столетия будут оставаться таковыми в изменившемся климате. И именно почвенный фактор станет основным ограничителем роста урожайности, который можно будет преодолеть только увеличением вложений в оптимизацию неблагоприятных свойств почв.

**Выводы.** Рост урожайности зерновых в России в последние годы хорошо согласуется с трендом изменения агрометеорологических условий в большинстве зернопроизводящих регионов страны.

Однонаправленные тренды метеорологически потенциальной и статистической урожайности отсутствуют только в регионах центра Европейской части России, где вклад климатического фактора в варьирование урожайности зерновых менее значим и где можно предположить влияние мер, предпринимаемых для поддержки и развития сельского хозяйства.

Эти выводы получены на уровне трендов и представляют собой только общую закономерность в достаточном обобщенном виде.

### Литература

1. *FAO. World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2022. Rome: FAO, 2022. 382 p. doi: 10.4060/cc2211en.*
2. *Abys C., Skakun S., Becker-Reshef I. The Rise and Volatility of Russian Winter Wheat Production // Environmental Research Communications. 2022. Vol. 4. No. 10. 101003. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2515-7620/ac97d2> (дата обращения: 05.02.2023). doi: 10.1088/2515-7620/ac97d2.*
3. *Влияние факторов эффективного плодородия почвы на урожайность и качество зерна яровой пшеницы и их моделирование в условиях умеренно-засушливой и колочной степи Алтайского края / И.П. Аверьянова, С.В. Жандарова, А.Б. Совриков и др. // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 6. С. 15–20.*
4. *Агроинвестор. Россельхозбанк: за пять лет урожайность зерновых в России выросла на 23%. URL: <https://agrarian.expert/rosselhozbank-za-pyat-let-urozhajnost-zernovyh-v-rossii-vyrosla-na-23>. (дата обращения: 05.02.2023).*
5. *Сизов А.А. Как изменения климата оказались на руку российским аграриям. URL: <https://sber.pro/publication/kak-izmeneniia-klimata-okazalis-na-ruku-rossiiskim-agrariiam> (дата обращения: 05.02.2023).*
6. *Карта распаханности почв России / И.Ю. Савин, В.С. Столбовой, С.А. Аветян и др. // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2018. № 94. С. 38–56. doi: 10.19047/0136-1694-2018-94-38-56.*
7. *Столбовой В.С., Молчанов Э.Н. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России как модель пространственной организации почвенного покрова // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2015. № 5. С. 135–143.*
8. *Araghi A., Martinez C.J., Olesen J. E. Evaluation of multiple gridded solar radiation data for crop modeling // European Journal of Agronomy. 2022. № 133. P.126419. doi: 10.1016/j.eja.2021.126419.*
9. *25 Years of the WOFOST Cropping Systems Model / A. de Wit, H. Boogaard, D. Fumagalli, et al. // Agricultural Systems. 2019. Vol. 168. No. 1. P. 154–167. doi: 10.1016/j.agsy.2018.06.018.*
10. *Савин И.Ю., Столбовой В.С., ван Диепен К. Имитационная модель роста сельскохозяйственных растений WOFOST и ее использование для анализа продуктивности земель России. М.: РАСХН, 2001. 216 с.*
11. *Савин И.Ю., Столбовой В.С., Савицкая Н.В. Климатический потенциал урожайности озимой пшеницы в России // Российская сельскохозяйственная наука. 2017. № 3. С. 17–20.*



12. Кошкин Е.И., Гусейнов Г.Г. Экологическая физиология сельскохозяйственных культур. М.: РГ-Пресс, 2020. 576 с.
13. How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis / P. Grassini, L. van Bussel, J. van Wart, et al. // *Field Crops Research*. 2015. Vol. 177. P. 49–63. doi: 10.1016/j.fcr.2015.03.004.
14. Росстат. Методические указания по проведению текущих расчетов объемов производства основных продуктов сельского хозяйства (в натуральном выражении) в хозяйствах всех категорий. М.: Росстат, 2019. 64 с.
15. Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models / J. Jägermeyr, C. Müller, A.C. Ruane, et al. // *Nature Food*. 2021. No. 2. P. 873–885. doi: 10.1038/s43016-021-00400-y.

**Поступила в редакцию 06.02.2023**

**После доработки 28.02.2023**

**Принята к публикации 09.03.2023**

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ СВЯЗЫВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ЧЕРНОЗЕМЕ ТИПИЧНОМ СЛАБОЭРОДИРОВАННОМ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ БИОПРЕПАРАТОВ

Н.П. Масютенко, доктор сельскохозяйственных наук, А.В. Кузнецов, кандидат сельскохозяйственных наук,  
М.Н. Масютенко, кандидат сельскохозяйственных наук, Т.И. Панкова, кандидат биологических наук,  
Г.М. Брескина, кандидат сельскохозяйственных наук

Курский федеральный аграрный научный центр,  
305021, Курск, ул. Карла Маркса, 70б  
E-mail: vninp@mail.ru

Исследования проводили с целью изучения эффективности связывания органического углерода черноземом типичным слабоэродированным при использовании с побочной продукцией сельскохозяйственных культур биопрепаратов (на основе *Trichoderma viride* и *Pseudomonas aureofaciens*) отдельно или совместно с азотом и её корреляции с показателями трансформации растительных остатков и биологического состояния почвы. Почва – чернозем типичный слабоэродированный тяжелосуглинистый с содержанием в пахотном слое гумуса (по Тюрину) 5,11...5,36 %; азота щелочногидролизуемого – 160,2±2,6 мг/кг, подвижного фосфора и калия (по Чирикову) – 112,0±7,8 и 102,2±9,8 мг/кг соответственно; обменного кальция – 223,5±2,2 мг-экв/кг, с близкой к нейтральной реакцией среды ( $pH_{KCl}$  – 5,6±0,1). Работу выполняли в 2018–2021 гг. в Курской области в зернопропашном севообороте (подсолнечник – ячмень – соя – гречиха). Схема стационарного полевого опыта включала следующие варианты: измельченная побочная продукция (контроль) – фон; фон + аммиачная селитра из расчета 10 кг д.в. N на 1 т побочной продукции (фон + азот); обработка Грибофитом и Имуназотом семян, почвы перед посевом, растений 2 раза за вегетацию и измельченной побочной продукции (фон + биопрепараты); фон + биопрепараты + азот. Эффективность связывания органического углерода в почве рассчитывали по формуле, выведенной на основе изучения динамики запасов гумуса в пахотном слое, ежегодного поступления измельченной побочной продукции и содержания в почве пожнивно-корневых остатков. Применение биопрепаратов повышало эффективность связывания органического углерода в пахотном слое почвы в 3,7 раза, биопрепаратов и азота – в 4,9 раза, только внесение азота – в 2,3 раза, по сравнению с контролем. Установлена прямая очень тесная корреляция между эффективностью связывания органического углерода в почве со средней скоростью разложения растительных остатков ( $r=0,98$ ), тесная – с эмиссией  $CO_2$  из почвы ( $r=0,88$ ), средняя – с целлюлолитической активностью почвы ( $r=0,69$ ).

## EFFICIENCY OF ORGANIC CARBON SEQUESTRATION IN TYPICAL SLIGHTLY ERODED CHERNOZEM

N.P. Masyutenko, A.V. Kuznetsov, M.N. Masyutenko, T.I. Pankova, G.M. Breskina

Federal Agricultural Kursk Research Center,  
305021, Kursk, ul Karla Marksa, 70b  
E-mail: vninp@mail.ru

The research was carried out to study the efficiency of organic carbon sequestration (ESCS) in the arable layer of typical slightly eroded chernozem when biopreparations (based on *Trichoderma viride* and *Pseudomonas aureofaciens*) were applied with by-products of crops separately or together with nitrogen, nitrogen fertilizers, as well as to assess its relationship with indicators of transformation of plant residues and biological state of soil. The object of the study was typical slightly eroded heavy loamy chernozem on carbonate loess-like loams with humus content in the topsoil (according to Tyurin's method) of 5.11...5.36%; that of alkaline hydrolyzable nitrogen 160.2±2.6 mg/kg, mobile phosphorus and potassium (according to Chirikov's method) 112.0±7.8 mg/kg and 102.2±9.8 mg/kg, respectively, that of exchange calcium 223.5±2.2 mg-eq/kg, with a medium reaction close to neutral ( $pH_{KCl}$  5.6±0.1). The research was carried out in 2018–2021 in a stationary field experiment with biopreparations in Kursk Region, in a grain-row crop rotation (sunflower-barley-soybeans-buckwheat). The experimental design included the following variants: crushed by-products (background) as a control; background + nitrogen of ammonium nitrate at the rate of 10 kg of PPN per 1 ton of by-products; treating seeds, soil before sowing, crops 2 times during the growing season and crushed by-products before embedding them in the soil (biopreparations + background) with biopreparations Gribophyte and Imunazot; biopreparations + background + nitrogen of ammonium nitrate at the rate of 10 kg of PPN per 1 ton of by-products. The efficiency of organic carbon sequestration in the soil was calculated according to the formula proposed by the authors based on the study of the dynamics of humus reserves in the arable soil layer, the annual intake of crushed by-products into the soil and the content of crop-root residues in the soil. It was revealed that the use of biopreparations and crushed by-products contributed to an increase in ESCS in the arable soil layer 3.7 times, the combined use of biopreparations with N 4.9 times, and the application of only  $N_{10}$  kg of PPN with 1 ton of by-products 2.3 times compared with the control (by adding only crushed by-products). A direct, very close correlation of efficiency of organic carbon sequestration in the soil with an average rate of decomposition of plant residues ( $r=0.98$ ), a close one with  $CO_2$  emission from the soil ( $r=0.88$ ), and an average one with the cellulolytic activity of the soil ( $r=0.69$ ) was established.

**Ключевые слова:** органический углерод, гумус, эффективность связывания, чернозем типичный слабоэродированный, побочная продукция, биопрепараты, азотные минеральные удобрения, зернопропашной севооборот, связь, скорость разложения растительных остатков, показатели биологической активности почвы.

**Key words:** organic carbon, humus, sequestration efficiency, typical slightly eroded chernozem, by-products, biopreparations, nitrogen mineral fertilizers, grain crop – row crop rotation, relation, rate of decomposition of plant residues, indicators of biological activity of the soil.

Проблема связывания органического углерода почвой, при котором происходит перевод атмосферного углекислого газа в биомассу растений (фотосинтез),

перемещение его в состав почвенного органического вещества посредством заделки растительной биомассы в почву с последующей трансформацией в гумус и долго-

временным сохранением в резервуаре органического вещества почвы с минимальным риском немедленного возврата в атмосферу (почвенная секвестрация), стала особенно актуальной в последние десятилетия [1, 2, 3]. Это вызвано тем, что сельскохозяйственное использование земель и проявление эрозийных процессов привели к значительным потерям органического углерода из пахотных почв во всем мире, ухудшению качества почвенного органического вещества [4, 5, 6]. Усиление минерализации гумуса приводит, с одной стороны, к увеличению поступления в атмосферу  $\text{CO}_2$ , что сопровождается изменением климата – глобальным потеплением, с другой, к снижению качества и деградации почв [7, 8, 9].

Связывание органического углерода почвой препятствует росту концентрации этого элемента в атмосфере, а также способствует сохранению и накоплению почвенного органического вещества, выступающего основой плодородия, здоровья, повышения продуктивности земель и предотвращения деградации почвенных ресурсов [10, 11, 12]. В связи с этим, в последние годы возрастает актуальность изучения процессов, связанных с почвенной секвестрацией углерода, оценки их эффективности с целью выявления приемов, способов и агротехнологий управления и повышения интенсивности секвестрации [13, 14, 15].

Цель исследований – изучение эффективности связывания органического углерода в пахотном слое чернозема типичного слабоэродированного при применении с побочной продукцией сельскохозяйственных культур биопрепаратов отдельно или совместно с азотом минеральных удобрений, а также оценка её корреляции с показателями трансформации растительных остатков и биологического состояния почвы.

**Методика.** Работу проводили в 2018–2021 гг. на опытном поле ФГБНУ «Курский ФАНЦ» (Курская обл., Медвенский р-н, с. Панино) в стационарном полевом опыте на чернозёме типичном слабоэродированном тяжелосуглинистом на северном склоне в зерно-пропашном севообороте (подсолнечник масличный гибрид Имерия КС – ячмень яровой сорта Суздаlec – соя сорта Казачка – гречиха сорта Деметра). Агрохимическая характеристика пахотного (0...20 см) слоя почвы: содержание гумуса (по Тюрину) – 5,11...5,36 %; азота щелочногидролизуемого – 160,2±2,6 мг/кг, подвижных (по Чирикову) фосфора – 112,0±7,8 мг/кг и калия – 102,2±9,8 мг/кг; обменного кальция – 223,5±2,2 мг-экв./кг, реакция среды близкая к нейтральной ( $\text{pH}_{\text{КСI}} - 5,6\pm 0,1$ ).

Схема опыта включала следующие варианты: измельчённая (до 5...7 см) побочная продукция сельскохозяйственной культуры (стебли, солома и др.) – контроль (фон); фон + аммиачная селитра из расчета 10 кг д.в. азота на 1 т побочной продукции (фон + азот); обработка семян биопрепаратами Грибофит (Г) 2 л/га и Имуназот (И) 3 л/га + обработка почвы перед посевом биопрепаратами (3 л/га Г + 2 л/га И) + обработка посевов биопрепаратами (3 л/га Г + 2 л/га И) 2 раза в течение вегетации + обработка измельчённой побочной продукции после уборки урожая биопрепаратами (5 л/га Г + 3 л/га И) перед заделкой в почву (фон + биопрепараты); фон + биопрепараты + азот.

Экологически безопасный, обладающий биофунгицидными, ростостимулирующими и фосфатмобилизирующими свойствами, микробиологический препарат Грибофит (Г) содержит споры и мицелий гриба *Trichoderma viride*, а также продуцируемые грибом в процессе производственного культивирования биологически активные вещества (антибиотики,

ферменты, витамины, фитогормоны). Биофунгицид, ростостимулятор, фосфатмобилизатор контактного и системного действия Имуназот (И) содержит ризосферные бактерии *Pseudomonas aureofaciens*, [16].

Общая площадь делянки составляла 240 м<sup>2</sup> (6 м × 40 м), учетная – 152 м<sup>2</sup> (4 м × 38 м), повторность – 3-кратная. Обработку измельчённых растительных остатков биопрепаратами проводили опрыскивателем ОП-2000/24, внесение аммиачной селитры – навесным разбрасывателем РН-0,8, заделку измельчённых растительных остатков в почву – дисковыми боронами на глубину 10...12 см. Технологии возделывания сельскохозяйственных культур, за исключением изучаемых факторов, общепринятые в лесостепной зоне региона [17, 18].

Для определения запасов углерода гумуса в пахотном слое почвы почвенные образцы отбирали осенью по диагонали делянки из 5 точек буром в слоях 0...10, 10...20 см, содержание углерода гумуса определяли по методу Тюрина (ГОСТ 26213–91). После уборки урожая учитывали количество побочной продукции на площадках 1 м<sup>2</sup> в трёхкратной повторности, пробы для определения содержания в почве пожнивнокорневых остатков отбирали буром объёмом 500 см<sup>3</sup> в трёхкратной повторности в слоях 0...10 см и 10...20 см с последующим отмыванием на ситах. При расчёте количества органического углерода, поступившего в пахотный слой почвы с побочной продукцией и пожнивнокорневыми остатками возделываемых культур, принимали, что содержание С в них составляет примерно 40 % [19]. Влажность почвы определяли термостатно-весовым методом, плотность почвы – по методу Н.А. Качинского [20]. Ежегодно в вариантах опыта изучали скорость разложения поступившей в почву в первые 1,5...2,0 месяца после заделки измельчённой побочной продукции возделываемых культур на основании экспериментальных данных по собственной методике [21]. Эмиссию  $\text{CO}_2$  из почвы изучали по фазам развития культур и перед уборкой урожая в трёхкратной повторности в полевых условиях по методу Л.О. Карпачевского [22], целлюлозолитическую активность почвы – методом аппликаций в 3-кратной повторности [23].

Для оценки воздействия различных факторов, а также приёмов, способов и агротехнологий на процессы, связанные с почвенной секвестрацией углерода, был предложен показатель – эффективность почвенного связывания (секвестрации) органического углерода в гумусе (ЭПСУ). Он характеризует долю трансформирующегося в гумус почвы углерода от общего количества органического углерода, поступившего в почву с удобрениями (в том числе, с соломой, стеблями, ботвой – побочной продукцией) и пожнивнокорневыми остатками возделываемых сельскохозяйственных культур. Величину этого показателя рассчитывали на основе предложенной нами формулы и экспериментальных данных за 2018–2021 гг. в зернопропашном севообороте для пахотного слоя почвы:

$$\text{ЭПСУ (\%)} = (\text{C}_{\Gamma_n} - \text{C}_{\Gamma_1}) \cdot 100 / \{ (\text{C}_{\text{Спк}_1} + \text{C}_{\text{Спк}_2} + \dots + \text{C}_{\text{Спк}_n}) + (\text{C}_{\text{Co}_1} + \text{C}_{\text{Co}_2} + \dots + \text{C}_{\text{Co}_n}) \},$$

где  $\text{C}_{\Gamma_n}$  – запасы углерода гумуса в почве через n лет, т/га;  $\text{C}_{\Gamma_1}$  – запасы углерода гумуса в почве в первый год исследований, т/га;  $\text{Спк}_1, \text{Спк}_2, \text{Спк}_n$  – количество органического углерода, находящегося в пахотном слое почвы с пожнивнокорневыми остатками возделываемых культур в первый, второй и последующие годы, т/га (в период уборки урожая);  $\text{Co}_1, \text{Co}_2, \text{Co}_n$  – количество



органического углерода, поступившего в почву с органическими удобрениями в первый, второй и последующие годы, т/га; 100 – коэффициент перевода в %; n – количество лет.

Если запасы гумуса за изучаемый период снижаются, ЭСПУ может быть отрицательной величиной, что будет свидетельствовать об отсутствии связывания органического углерода в гумусе. При оценке ЭСПУ в первую ротацию севооборота можно определить эффективность и направленность процессов связывания органического углерода в гумусе почвы. Для оценки почвенной секвестрации органического углерода предлагаемый показатель ЭСПУ целесообразно определять за две и более ротаций севооборота.

Экспериментальные данные обрабатывали методами математической статистики с использованием программных средств Microsoft Office EXCEL, STATISTIKA, STATGRAF.

**Результаты и обсуждение.** Для исследования потоков органического углерода в системе растение – почва – гумус в зернопропашном севообороте после формирования органического вещества сельскохозяйственных культур в процессе фотосинтеза в 2018–2021 гг. было определено его количество, поступившее в пахотный слой почвы с побочной продукцией в виде органического удобрения ( $C_{Oy}$ ), пожнивно-корневыми остатками возделываемых культур (Спк). Величина этого показателя зависит от изучаемых в опыте факторов – сельскохозяйственная культура, азотное удобрение, биопрепарат, слой почвы (табл. 1). Основная часть побочной продукции и пожнивно-корневых остатков возделываемых культур концентрируется в верхнем (0...10 см) слое пахотного горизонта, в который проводится заделка измельченной побочной продукции. В результате в этом слое отмечено 54...80% органического углерода в пожнивно-корневых остатках и побочной продукции, а в слое 10...20 см – 20...46%. При этом распределение его по слоям различалось по годам, очевидно в зависимости от вида культуры и применения биопрепаратов.

При использовании биопрепаратов отдельно или совместно с N в 2018–2019 гг. отмечена только тенденция к увеличению запасов органического углерода в измельченной побочной продукции и растительных остатках в слое 0...20 см, по сравнению с контролем, а в слое 0...10 см они были примерно одинаковыми. В варианте с внесением аммиачной селитры из расчета

10 кг азота на 1 т измельченной побочной продукции выявлено повышение, по сравнению с контролем, запасов органического углерода в пожнивно-корневых остатках и побочной продукции в слоях 0...10 см и 10...20 см. В пахотном слое содержание органического углерода, поступившего с побочной продукцией и пожнивно-корневыми остатками возделываемых культур за 2018–2021 гг., в вариантах с применением биопрепаратов отдельно или с азотным удобрением, по сравнению с контролем, было больше соответственно на 23 и 42%, с внесением азота – на 40%.

Поступившее в почву и находящееся в ней органическое вещество, подвергается процессам трансформации, в результате которых часть его переходит в гумус. Об этом свидетельствует изменение содержания и запасов углерода в гумусе в слое. За 2018–2021 гг. в контроле при внесении измельченной побочной продукции подсолнечника, ячменя, сои, гречихи в пахотном слое чернозёма типичного слабоэродированного отмечена тенденция к росту величины этого показателя на 0,26 т/га (при  $НСР_{05} = 0,75$  т/га), в основном, вследствие незначимого ее повышения в слое 0...10 см (табл. 2). При внесении измельченной побочной продукции с азотом отмечено увеличение запасов углерода гумуса в пахотном слое почвы на 0,87 т/га, причем на 71% благодаря их повышению в слое 0...10 см. Применение биопрепаратов в сочетании с измельченной побочной продукцией сельскохозяйственных культур способствовало значимому увеличению запасов углерода гумуса в пахотном слое почвы на 1,16 т/га (при  $НСР_{05} = 0,75$  т/га), в основном, вследствие их повышения в слое 0...10 см. При использовании биопрепаратов, измельченной побочной продукции сельскохозяйственных культур и азота установлено значимое возрастание запасов углерода гумуса в пахотном слое почвы на 1,79 т/га.

Внесение с измельченной побочной продукцией сельскохозяйственных культур азота минерального удобрения способствовало росту ЭПСУ в пахотном слое почвы в 2,3 раза, по сравнению с контролем, в котором величина этого показателя составляла 2,1%. При использовании биопрепаратов с измельченной побочной продукцией сельскохозяйственных культур эффективность почвенного связывания органического углерода возросла в 1,5 раза, достигая 7,7%, а при совместном применении биопрепаратов и минерального

**Табл. 1. Количество органического углерода, поступившего в пахотный слой почвы с побочной продукцией и пожнивно-корневыми остатками возделываемых культур в зернопропашном севообороте, т/га**

Вариант	Глубина, см	Год, культура			
		2018, подсолнечник	2019, ячмень	2020, соя	2021, гречиха
Измельчённая побочная продукция – контроль (фон)	0...10	2,59±0,08	2,20±0,08	1,74±0,13	1,54±0,05
	10...20	0,93±0,04	1,10±0,05	1,46±0,11	0,75±0,03
	0...20	3,52±0,12	3,29±0,12	3,21±0,20	2,30±0,08
Фон + азот	0...10	4,63±0,13	2,44±0,11	1,86±0,07	2,84±0,11
	10...20	1,15±0,05	1,34±0,06	1,49±0,06	1,50±0,04
	0...20	5,78±0,17	3,78±0,16	3,35±0,13	4,34±0,15
Фон + биопрепараты	0...10	2,54±0,11	2,29±0,11	2,07±0,07	3,32±0,13
	10...20	1,31±0,07	1,15±0,04	1,23±0,05	1,21±0,04
	0...20	3,84±0,17	3,44±0,15	3,30±0,12	4,53±0,16
Фон + биопрепараты + азот	0...10	2,56±0,11	2,15±0,12	2,32±0,12	5,33±0,16
	10...20	1,30±0,07	1,04±0,05	1,36±0,08	1,47±0,05
	0...20	3,86±0,18	3,19±0,18	3,68±0,19	6,80±0,20

**Табл. 2. Динамика запасов углерода гумуса в пахотном слое чернозёма типичного слабоэродированного в зернопропашном севообороте в зависимости от внесения биопрепаратов и азотного минерального удобрения, т/га**

Вариант (фактор А)	Глубина, см	Год (фактор В)		
		2018	2021	среднее
Измельчённая побочная продукция сельскохозяйственной культуры – контроль (фон)	0...10	29,10	29,29	29,20
	10...20	32,71	32,78	32,75
	0...20	61,81	62,07	61,94
Фон + азот	0...10	30,00	30,62	30,31
	10...20	31,77	32,02	31,90
	0...20	61,77	62,64	62,21
Фон + биопрепараты	0...10	28,19	29,22	28,71
	10...20	33,16	33,29	33,23
	0...20	61,35	62,51	61,93
Фон + биопрепараты + азот	0...10	28,19	29,60	28,90
	10...20	33,17	33,54	33,36
	0...20	61,35	63,14	62,25
Среднее	0...10	28,87	29,68	29,28
	10...20	32,70	32,91	32,81
	0...20	61,57	62,59	62,08
НСР <sub>05</sub> для фактора А	0...10	0,32	0,49	
	10...20	0,33	0,38	
	0...20	0,59	0,69	
НСР <sub>05</sub> для фактора В	0...10		0,46	
	10...20		0,22	
	0...20		0,75	
НСР <sub>05</sub> для частных различий	0...10	0,37	0,50	
	10...20	0,39	0,40	
	0...20	0,74	0,85	

азота она увеличилась в 2 раза до 10,2 %, по сравнению с обработкой побочной продукции только азотным минеральным удобрением, а по сравнению с контролем, – соответственно в 3,7 и 4,9 раза.

В первые 1,5...2,0 месяца после применения биопрепараты более эффективно, чем азотные удобрения, воздействуют на скорость разложения поступившей в почву измельченной побочной продукции возделываемых культур (рис.1). В среднем она возрастает, по сравнению с контролем, в 1,7 раза. При использовании биопрепаратов совместно с азотом величина этого показателя повышается в 1,8 раза, только азотного удобрения – в 1,4 раза.

Эффективность почвенной секвестрации органического углерода за 2018–2021 гг. в зернопропашном



**Средняя скорость разложения поступивших в пахотный слой почвы в 2018–2021 гг. побочной продукции и пожнивно-корневых остатков возделываемых культур, сутки<sup>-1</sup>.**

севообороте в пахотном слое чернозёма типичного слабоэродированного была очень тесно связана со средней скоростью разложения побочной продукции и пожнивно-корневых остатков возделываемых культур, коэффициент корреляции (r) составил 0,98 при уровне значимости (λ) 0,05. Тесная корреляция выявлена между эффективностью почвенного связывания органического углерода (ЭПСУ) за 2018–2021 гг. в зернопропашном севообороте в пахотном слое чернозёма типичного слабоэродированного и средней эмиссией из почвы CO<sub>2</sub> – r=0,88 при λ=0,05; средняя – со средней целлюлолитической активностью – r=0,69 при λ=0,05.

**Выводы.** Наибольшее воздействие на эффективность процессов, связанных с секвестрацией почвенного углерода в черноземе типичном слабоэродированном, оказывает совместное применение биопрепаратов на основе *Trichoderma viride* и *Pseudomonas aureofaciens* с внесением азота и измельчённой побочной продукции сельскохозяйственных культур (ЭПСУ = 10,2 %), несколько меньше – только обработка биопрепаратами (ЭПСУ=7,7 %) или только внесение азота (ЭПСУ=5,0 %). Использование измельчённой побочной продукции сельскохозяйственных культур без азота и биопрепаратов по отдельности или в сочетании обеспечивает низкую эффективность связывания органического углерода в почве на уровне 2,1 %.

Установлены прямые корреляции эффективности связывания органического углерода в почве со средней скоростью разложения поступивших в пахотный слой побочной продукции и пожнивно-корневых остатков возделываемых культур, средней эмиссией углекислого газа из почвы, целлюлолитической активностью почвы. По силе связи их можно расположить в следующем

убывающем порядке: средняя скорость разложения ( $r=0,98$ ) > эмиссия  $\text{CO}_2$  ( $r=0,88$ ) > целлюлозолитическая активность почвы ( $r=0,69$ ).

Показатель эффективности связывания (секвестрации) органического углерода в почве целесообразно применять для оценки используемых способов внесения биопрепаратов и удобрений, обработки почвы, севооборотов и агротехнологий.

### Литература

1. Дегумирование и почвенная секвестрация гумуса / Б.М. Козут, В.М. Семёнов, З.С. Артемьева и др. // *Агрохимия*. 2021. № 5. С. 3–13. doi: 10.31857/S0002188121050070.
2. Aertsens J., De Nocker L., Gobin A. Valuing the carbon sequestration potential for European agriculture // *Land Use Policy*. 2013. No. 31. P. 584–594. doi: 10.1016/j.landusepol.2012.09.003.
3. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon / U. Stockmann, M.A. Adams, J.W. Crawford, et al. // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2013. Vol. 164. P. 80–99.
4. Мониторинг основных агрохимических показателей плодородия пахотных почв в Центральном-Черноземном районе России / Р.В. Некрасов, С.В. Лукин, Д.А. Куницын др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2021. Т. 35. № 9. С. 4–10.
5. Влияние развития эрозийных процессов на содержание и запасы органического вещества, урожайность озимой пшеницы и разнотравно-злаковых ассоциаций, возделываемых на темнокаштановых почвах // В.А. Стукало, Т.Г. Зеленская, Е.Е. Степаненко и др. // *Земледелие*. 2021. № 4. С. 20–23.
6. Качественный состав органического вещества дерново-подзолистой почвы в длительном полевом опыте // Р.Ф. Байбеков, К.П. Хайдуков, А.А. Коваленко и др. // *Земледелие*. 2020. № 1. С. 8–11
7. Sanderman J., Hengl T., Fiske J.G. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America Proc*. 2017. Vol. 114. P. 9575–9580. doi: 10.1073/pnas.1706103114.
8. Влияние агроботехнологий на запасы и состав органического вещества чернозема типичного слабоэродированного / Н.П. Масютенко, А.В. Кузнецов, М.Н. Масютенко и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2021. Т. 35. № 10. С. 45–50.
9. Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept / M.J. Castellano, K.E. Mueller, D.C. Oik, et al. // *Global Change Biology*. 2015. Vol. 21. No. 9. P. 3200–3209. doi: 10.1111/gcb.12982.
10. Amundson R., Biardeau L. Soil carbon sequestration is an exclusive climate mitigation tool // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America Proc*. 2018. Vol. 115. No. 46. P. 11652–11656.
11. Soil Quality Refurbishment through Carbon Sequestration in Climate Change: A Review / V. Kumar, K. Sharma, V. Sharma, et al. // *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2017. Vol. 6. P. 1210–1223. doi: 10.20546/ijcmas.2017.605.131.
12. Сафин Р.И., Валиев А.Р., Колесар В.А. Современное состояние и перспективы развития углеродного земледелия в Республике Татарстан // *Вестник Казанского ГАУ*. 2021. №3 (63). С. 7–13.
13. Experimental consideration, treatments, and methods in determining soil organic carbon sequestration rates / K.R. Olson, M.M. Al-Kaisi, R. Lal, et al. // *Soil Science Society of America Journal*. 2014. Vol. 78. P. 348–360. doi: 10.2136/sssaj2013.09.0412.
14. Агротехнологический потенциал управления органическим углеродом черноземов обыкновенных в зернопаропропашном севообороте / И.Т. Хусниев, В.А. Романенков, С.В. Пасько и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2022. № 3. С.38–44.
15. Амиров М.Ф. Интенсивность усвоения углерода полевыми культурами в зависимости от технологии возделывания в условиях Республики Татарстан // *Вестник Казанского ГАУ*. 2021. №3 (63). С. 14–18
16. Брескина Г.М., Чуян Н.А. Влияние приемов биологизации на урожайность сельскохозяйственных культур // *Земледелие*. 2020. № 3. С. 30–33.
17. Регистр технологий возделывания зерновых культур для Центрального Черноземья / Г.Н. Черкасов, И.Г. Пыхтин, А.В. Гостев и др. Курск: ВНИИЗиЗПЭ РАСХН, 2013. 249 с.
18. Регистр технологий возделывания масличных культур для Центрального Черноземья / Г.Н. Черкасов, И.Г. Пыхтин, А.В. Гостев и др. Курск: ВНИИЗиЗПЭ РАСХН. 2014. 179 с.
19. Разложение растительных остатков и формирование активного органического вещества в почве инкубационных экспериментов / В.М. Семенов, Н.Б. Паутова, Т.Н. Лебедева и др. // *Почвоведение*. 2019. № 10. С. 1172–1184.
20. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почвы. М.: Агропромиздат. 1986. 416 с.
21. Влияние биопрепаратов на почвенное органическое вещество, структурное и биологическое состояние чернозема типичного слабоэродированного: коллективная монография / Н.П. Масютенко, А.В. Кузнецов, Н.А. Чуян и др. Курск: ФГБНУ «Курский ФАНЦ», 2022. 217 с.
22. Карпачевский Л.О. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977. 312 с.
23. Мишустин Е.В., Востров И.П., Петрова А.Н. Методика определения целлюлозоразрушающей активности почвы. М.: Наука, 1987. 375 с.

Поступила в редакцию 09.02.2023

После доработки 03.03.2023

Принята к публикации 14.03.2023



## ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ СОЕДИНЕНИЙ НИКЕЛЯ В ПОЧВЕ И ЕГО НАКОПЛЕНИЕ В РАСТЕНИЯХ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ РОСТСТИМУЛИРУЮЩИХ РИЗОСФЕРНЫХ БАКТЕРИЙ НА ЗАГРЯЗНЕННОЙ ТЯЖЕЛЫМ МЕТАЛЛОМ ПОЧВЕ

**В.П. Шабаяев**<sup>1</sup>, доктор биологических наук, **В.Е. Остроумов**<sup>1</sup>, старший научный сотрудник, **И.О. Плеханова**<sup>2</sup>, доктор биологических наук, **В.О. Куликов**<sup>2</sup>, аспирант, **М.П. Волокитин**<sup>3</sup>, кандидат сельскохозяйственных наук

<sup>1</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, 142290, Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 2  
E-mail: vpsh@rambler.ru

<sup>2</sup>Факультет почвоведения МГУ им. М. В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

<sup>3</sup>Институт фундаментальных проблем биологии РАН, 142290, Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 2

*В вегетационном опыте изучено влияние бактерий рода Pseudomonas на фракционный состав соединений никеля в искусственно загрязненной агросерой почве и урожаем яровой пшеницы. Схема опыта включала следующие варианты: без внесения никеля и бактерий; внесение никеля без бактерий; внесение никеля и 20-го штамма бактерии P. fluorescens; внесение никеля и 21-го штамма бактерии P. fluorescens; внесение никеля и 23-го штамма бактерии P. putida 23. Растения выращивали до фазы выхода в трубку при загрязнении почвы NiCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O в дозе 300 мг Ni/kg на фоне внесения NPK удобрений. Распределение никеля в почве определяли во фракциях, выделенных методом последовательных селективных экстракций. Содержание никеля в растениях после озоления в смеси HNO<sub>3</sub>:HClO<sub>4</sub> (2:1) и в почвенных фракциях устанавливали методом эмиссионно-оптической спектрометрии индуктивно-связанной плазмы. Бактерии увеличивали содержания никеля в обменной и специфически сорбированной фракциях, в меньшей мере во фракциях, связанных с органическим веществом и с железистыми минералами, и уменьшали содержание металла в остаточной фракции. Применение бактерий повысило устойчивость растений к повышенной концентрации никеля и увеличило урожай, значительно снижая фитотоксичность тяжелого металла. Бактерии повышали вынос никеля из почвы надземными органами растений, главным образом вследствие увеличения урожая, без изменений или увеличения содержания металла в растениях. Тем самым, бактерии усиливали фитоэкстракцию – очистку почвы от тяжелого металла. Вынос никеля растениями возрастал вследствие увеличения его биодоступности, в основном благодаря обменной и специфически сорбированной фракциям.*

## FRACTIONAL COMPOSITION OF NICKEL COMPOUNDS IN SOIL AND ITS ACCUMULATION IN PLANTS IN APPLICATION OF GROWTH PROMOTING RHIZOSPHERE BACTERIA ON HEAVY METAL-CONTAMINATED SOIL

**V.P. Shabayev**<sup>1</sup>, **V.E. Ostroumov**<sup>1</sup>, **I.O. Plekhanova**<sup>2</sup>, **V.O. Kulikov**<sup>2</sup>, **M.P. Volokitin**<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, Russian Academy of Sciences, 142290, Pushchino, Moskovskaya obl., ul. Institutskaya 2  
E-mail: vpsh@rambler.ru

<sup>2</sup>Soil Science Department Moscow State University, 119991, Moskva, Leninskie gory, 1

<sup>3</sup>Institute Basic Biological Problems, Russian Academy of Sciences, 142290, Pushchino, Moskovskaya obl., ul. Institutskaya 2

*Impact of genus Pseudomonas bacteria on fractional composition of nickel compounds in artificially contaminated agro-gray soil and yield of spring wheat was studied in pot experiment. Plants were grown up to booting stage with NiCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O contamination at a rate of 300 Ni/kg of soil against background of NPK fertilization. Distribution of nickel in soil fractions isolated by the method of successive selective extractions has been established. Nickel content in plants after combustion in mixture of HNO<sub>3</sub>:HClO<sub>4</sub> (2:1) and in soil fractions was determined by inductively coupled plasma emission-optical spectrometry. Application of bacteria increased plant resistance to elevated nickel concentration and increased yield, significantly reducing heavy metal phytotoxicity. Bacteria increased nickel content in exchangeable and specifically sorbed fractions and, to a lesser extent, in fractions associated with organic matter and ferruginous minerals, and reduced metal content in residual fraction. Bacteria increased nickel uptake from soil by plant shoots due to increase in yield, without changes or increase in plant metal content. Thus, bacteria increased phytoextraction – cleaning soil from heavy metal. Nickel uptake by plants was increased due to increase in its bioavailability, mainly in exchangeable and specifically sorbed fractions.*

**Ключевые слова:** бактерии Pseudomonas, яровая пшеница (Triticum aestivum L.), агросерая почва, NiCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, фракции Ni

**Key words:** bacteria Pseudomonas, spring wheat (Triticum aestivum L.), agro-gray soil, NiCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, Ni fractions

В последние годы исследователи много внимания уделяют изучению стимулирующих рост растений ризосферных бактерий (plant growth-promoting rhizobacteria, PGPR) для повышения продуктивности

сельскохозяйственных культур [1, 2], а также для ремедиации загрязненных тяжелыми металлами (ТМ) почв [3, 4, 5], включая никель (Ni) [6]. Представители PGPR рода Pseudomonas привлекают особое внимание

благодаря широкой распространенности и присущим им полезным для растений свойствам [7, 8]. Созданы биопрепараты на основе бактерий рода *Pseudomonas*, позволяющие увеличить урожай и минимизировать применение агрохимикатов [9]. Использование PGPR рода *Pseudomonas* существенно уменьшало фитотоксичность Ni и повышало устойчивость различных растений к токсическому действию ТМ [6, 10, 11]. В литературе имеются многочисленные данные, свидетельствующие о значительной стимуляции роста растений под влиянием PGPR, однако исследований, направленных на изучение растительных и в особенности почвенных механизмов ремедиации загрязненных ТМ почв, в том числе Ni, под влиянием этих бактерий, проведено недостаточно.

Цель исследований – изучение влияния внесения PGPR рода *Pseudomonas* на фракционный состав соединений Ni в почве, урожай яровой пшеницы и накопление в растениях Ni при выращивании на агросерой почве, загрязненной ТМ.

**Методика.** Эксперименты проводили при выращивании растений сорта яровой пшеницы (*T. aestivum* L.) Злата (Московский НИИСХ «Немчиновка») в вегетационном опыте при искусственном загрязнении агросерой почвы (Luvisol) юга Московской области водорастворимым соединением Ni. Использовали пахотную, среднесуглинистую агросерую почву (слой 0...20 см). В сосудах диаметром 10 см и высотой 11 см, содержащих 800 г почвы, выращивали по 10 растений в течение 26 дней до фазы трубкования при внесении 300 мг Ni/kg почвы, что в 7,5 раз превышает ориентировочную допустимую концентрацию (ОДК) для аналогичных почв. Схема опыта включала следующие варианты: без внесения никеля и бактерий – контроль; внесение никеля без бактерий; внесение никеля и 20-го штамма бактерий *P. fluorescens*; внесение никеля и 21-го штамма бактерий *P. fluorescens*; внесение никеля и 23-го штамма бактерий *P. putida*. Использованные микроорганизмы стимулировали рост и повышали урожай зерновых, бобовых, корнеплодных культур и ярового рапса [12]. Семена перед посевом стерилизовали 10%-ным раствором гипохлорита натрия, затем промывали стерильной водой. При посеве их раскладывали на почве и инокулировали водными суспензиями чистых культур бактерий в водопроводной воде из расчета  $10^6$  на растение (10 мл суспензии на сосуд) и засыпали 3 см слоем почвы. В варианте без использования бактерий применяли аналогичным образом автоклавируемые бактериальные суспензии. В почву за 10 дней до посева семян, вносили  $NiCl_2 \cdot 6H_2O$  в виде раствора, на фоне внесения NPK солей из расчета по 100 мг каждого элемента на 1 кг почвы в виде азотнокислого аммония, двухзамещенного

фосфорнокислого калия и сернокислого калия, все соли были квалификации не ниже «хч» (Реахим, Россия). Влажность почвы в сосудах в течение вегетации растений поддерживали поливами на уровне не ниже 60 % полной полевой влагоемкости.

Вегетативную массу (листья и стебли) после срезания растений высушивали при 70 °С и озоляли (0,5 г) в смеси концентрированных кислот  $HNO_3:HClO_4$  (2:1). Соединения Ni в почве фракционировали методом последовательных селективных экстракций [13]. Выделяли следующие фракции Ni: водорастворимую, обменную (экстрагент –  $Ca(NO_3)_2$ ) специфически сорбированную, связанную с карбонатами ( $CH_3COOH$ ), связанную с органическим веществом ( $K_4P_2O_7$ ) и связанную с железистыми минералами (реактив Тамма). Содержание Ni в остаточной фракции, прочно связанной с глинистыми минералами, определяли по разности между внесенным в почву количеством ТМ и его суммой во фракциях, выделенных перечисленными экстрагентами. Содержание Ni в почвенных фракциях и в растениях определяли методом эмиссионно-оптической спектроскопии индуктивно-связанной плазмы на спектрометре ICP OES Optima 5300 DV (Perkin Elmer, США). Используя функцию F.TEST статистического пакета MS Excel 2010, оценивали уровень значимости различий между контролем и опытными данными, который всегда был не ниже 95 %. Статистические ошибки определений не превышали 15 %.

**Результаты и обсуждение.** Анализ распределения соединений Ni в загрязненной почве показал его присутствие во всех выделенных фракциях (табл. 1). Вне зависимости от применения бактерий в водорастворимой фракции содержалось около 3 % от внесенного количества Ni. Основная его часть была сосредоточена в остаточной фракции, связанной с глинистыми минералами, составляя по вариантам 44...57 % от внесенного количества. В модельном эксперименте при внесении  $NiNO_3$  в дерново-подзолистую почву и чернозем Ni был представлен во всех фракциях, выделенных используемым методом, что объясняется достаточно высоким средством этого элемента ко всем основным почвенным компонентам, вне зависимости от типа почв [14]. Фракционный состав Ni в почвах отличался значительным преобладанием остаточной фракции над подвижными [14, 15]. Остаточный Ni был преобладающей фракцией в аллювиальных почвах и достигал 64 % от валового содержания ТМ [16].

Внесение бактерий оказывало существенное влияние на распределение Ni в почве, за исключением водорастворимой фракции. Под воздействием бактерий после проведения учета урожая было обнаружено максималь-

Табл. 1. Фракционный состав соединений Ni в почве

Вариант	Фракции Ni в почве*					
	водорастворимая	обменная	специфически сорбированная	связанная		
				с органическим веществом	с железистыми минералами	с глинистыми минералами (остаточная)
Ni без внесения бактерий	<u>9</u> 3,0	<u>32</u> 10,7	<u>25</u> 8,3	<u>25</u> 8,3	<u>38</u> 12,7	<u>171</u> 57,0
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	<u>9</u> 3,0	<u>56</u> 18,7	<u>36</u> 12,0	<u>28</u> 9,3	<u>40</u> 13,3	<u>131</u> 43,7
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	<u>10</u> 3,3	<u>71</u> 23,7	<u>40</u> 13,3	<u>32</u> 10,7	<u>49</u> 16,3	<u>98</u> 32,7
Ni + <i>P. putida</i> 23	<u>11</u> 3,7	<u>50</u> 16,7	<u>29</u> 9,7	<u>31</u> 10,3	<u>41</u> 13,7	<u>138</u> 46,0

\*в числителе – мг/кг почвы, в знаменателе – % от внесенного количества.

ное в опыте увеличение содержания ТМ в обменной фракции и в специфически сорбированной или связанной с карбонатами фракции, относительно контроля, соответственно в 1,6...2,2 и в 1,2...1,6 раза. Доля Ni в обменной фракции возросла с 11 до 17...24%, в специфически сорбированной – с 8 до 13 %. Эти закономерности были выражены в наибольшей степени при внесении *P. fluorescens* 21. Под влиянием этой бактерии также больше всего (в 1,3 раза) повысилось содержание Ni во фракциях, связанных с органическим веществом и с железистыми минералами. В вариантах с *P. fluorescens* 20 и *P. putida* 23 величины этих показателей не изменились или изменились незначительно. При внесении всех бактерий доля Ni во фракциях, связанных с органическим веществом и железистыми минералами, увеличилась менее значительно, соответственно с 8 до 11% и с 13 до 16 % от внесенного количества. Доля ТМ в остаточной фракции уменьшилась с 57 % в контроле до 33...46 % при использовании бактерий. В варианте с *P. fluorescens* 21 обнаружено минимальное в опыте содержание Ni в остаточной фракции вследствие наибольшего нахождения ТМ в подвижных фракциях, за исключением водорастворимой. В вариантах с *P. fluorescens* 20 и *P. putida* 23 в остаточной фракции содержалось 44...46 % Ni. Уменьшение доли Ni в остаточной фракции при ее увеличении в обменной и в меньшей степени в специфически сорбированной фракции с ростом количества внесенного NiNO<sub>3</sub> в почву отмечали и ранее [14]. Повышение содержания Ni в составе относительно подвижных обменной и специфически сорбированной фракций при внесении исследуемых бактерий рода *Pseudomonas*, вероятно, можно объяснить продуцированием бактериальных сидерофоров, которые образуют растворимые комплексы с Ni [17]. Бактериальные сидерофоры оказывают влияние на подвижность в почве и биодоступность металлов [18].

При загрязнении почвы Ni установлено существенное ингибирование роста яровой пшеницы в фазе трубкования (табл. 2). Это выразилось в уменьшении более чем вдвое массы вегетативных органов (суммы листьев и стеблей), относительно варианта без загрязнения ТМ и бактериальных инокуляций. Использование всех бактерий уменьшало токсическое действие ТМ на растения и стимулировало их рост в загрязненных условиях. При внесении *P. fluorescens* 20 вегетативная масса растений, подвергнутых Ni стрессу, была более чем в полтора раза выше, чем в варианте с загрязнением ТМ без бактериальных инокуляций. При этом растения, инокулированные

*P. fluorescens* 21 и *P. putida* 23, формировали на 44...47 % большую вегетативную массу.

Внесение бактерий *P. fluorescens* 20 не оказало влияния на содержание Ni в вегетативной массе. В варианте с *P. fluorescens* 21 величина этого показателя возросла на 28 %, с *P. putida* 23 – на 49 %. При загрязнении почвы установлено значительное увеличение выноса Ni (в мкг/сосуд) вегетативной массой. Использование бактерий способствовало дальнейшему его росту в 1,7...2,3 раза, по сравнению с вариантом с загрязнением Ni без бактерий, в наибольшей степени – при инокуляции *P. putida* 23. Под влиянием бактерий *P. fluorescens* 20 вынос Ni повысился вследствие увеличения массы вегетативных органов, без существенных изменений содержания ТМ. При применении *P. fluorescens* 21 и *P. putida* 23 накопление Ni возрастало вследствие повышения как массы растений, так и содержания в них Ni. Увеличение урожайности и выноса Ni из загрязненной почвы вегетативными органами растений в фазе выхода в трубку при внесении бактерий свидетельствует о том, что, с одной стороны, их использование повышает устойчивость растений к токсическому действию Ni, с другой – усиливает фитоэкстракцию ТМ и, следовательно, способствует ремедиации загрязненной почвы. Ранее было установлено, что эффективность фиторемедиации в условиях загрязнения ТМ можно усилить использованием стимулирующих рост растений бактерий, которые увеличивают растворимость и биодоступность ТМ вследствие образования сидерофоров, органических кислот и других соединений [19]. Большее накопление Ni в растениях при внесении бактерий, а, следовательно, усиление фитоэкстракции, вероятно, было обусловлено увеличением биодоступности ТМ вследствие увеличения его содержания в подвижных, прежде всего, в обменной и специфически сорбированной фракциях. Количество Ni в обменной форме оказывало наибольшее влияние на содержание ТМ в растениях люпина и овса [20].

**Выводы.** Внесение PGPR рода *Pseudomonas* усилило ремедиацию загрязненной Ni почвы. Внесение бактерий повысило устойчивость растений яровой пшеницы к повышенным концентрациям Ni и увеличило массу растений, значительно уменьшая фитотоксичность ТМ. Применение бактерий повысило вынос никеля надземными органами растений из почвы, тем самым, усилило фитоэкстракцию – очистку почвы от ТМ. Применение бактерий увеличило содержание Ni в почве в обменной и специфически сорбированной фракциях, в меньшей мере во фракциях, связанных с органическим веществом и с железистыми минералами, и уменьшило содержание металла в остаточной фракции. Повышение накопления Ni растениями при внесении бактерий соответствовало увеличению подвижности металла в почве, в основном его содержания в составе обменной и специфически сорбированной фракций.

### Литература

1. *Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. Review article / R. Backer, J.S. Roken, G. Ilangumaran, et al. // Front. Plant Sci., 23 October. 2018. URL: <http://www.mdpi.com/2223-7747/12/3/629> (дата обращения: 20.02.2023). doi: 10.3389/fpls.2018.01473.*
2. *Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): Current and future prospects for development of sustainable agriculture / G. Gupta, S.S. Parihar, N.K. Ahirwar, et al. // Journal of Microbial and Biochemical Technology.*

**Табл. 2. Урожай яровой пшеницы и вынос Ni растениями**

Вариант	Вегетативная масса, г/сосуд	Содержание Ni в растениях, мг/кг	Вынос Ni растениями, мкг/сосуд
Без внесения Ni и бактерий – контроль	2,44	8	20
Ni без внесения бактерий	1,20	254	305
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	2,00	265	530
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	1,73	325	562
Ni + <i>P. putida</i> 23	1,76	395	695
НСР <sub>05</sub>	0,37		91



2015. Vol. 7. No. 2. P. 96–102. doi: 10.4172/1948-5948.1000188
3. Review paper: Plant growth promoting microorganisms helping in sustainable agriculture: current perspectives / D. Mitra, S. Anđjelković, P. Panneerselvam, et al. // *International Journal of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine*. 2019. Vol. 7. No. 2. P. 50–74.
  4. Phytoremediation of heavy metals contaminated soil using plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): A current perspective / A. Handsa, V. Kumar, A. Anshumali, et al. // *Recent Research in Science and Technology*. 2014. Vol. 6. No. 1. P. 131–134.
  5. *Microbes for Sustainable Development and Bioremediation* / Eds Chandra R., Sobti R.C. Boca Raton: CRC Press. 2020. 386 p. doi: 10.1201/9780429275876
  6. Ризосферные бактерии рода *Pseudomonas* в современных агробиотехнологиях / Т.О. Анохина, Т.В. Сиунова, О.И. Сизова и др. // *Аэрохимия*. 2018. № 10. С. 54–66. doi: 10.1134/S0002188118100034.
  7. Dorjey S., Dolkar D., Sharma R. Plant growth promoting rhizobacteria *Pseudomonas*: A review // *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2017. Vol. 6. No. 7. P. 1335–1344. doi: 10.20546/ijcmas.2017.607.160.
  8. Pattnaik S., Mohapatra B., Gupta A. Plant growth-promoting microbe mediated uptake of essential nutrients (Fe, P, K) for crop stress management: microbe-soil-plant continuum. Review article // *Frontiers in Agronomy*. Vol. 09. August. 2021. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fagro.2021.689972/full> (дата обращения 12.10.2022). doi: 10.3389/fagro.2021.689972.
  9. Novel bioformulations developed from *Pseudomonas putida* BSP9 and its biosurfactant for growth promotion of *Brassica juncea* (L.) / I. Mishra, T. Fatima, D. Egamberdieva, et al. // *Plants*. 2020. Vol. 9. No. 10. 1349. <https://www.mdpi.com/2223-7747/9/10/1349> (дата обращения: 22.02.2023). doi: 10.3390/plants9101349.
  10. Ma Y., Rajkumar M., Freitas H. Isolation and characterization of Ni mobilizing PGPB from serpentine soils and their potential in promoting plant growth and Ni accumulation by *Brassica* spp. // *Chemosphere*. 2009. Vol. 75. No. 6. P. 719–725. doi: 10.1016/j.chemosphere.2009.01.056
  11. Inoculation of endophytic bacteria on host and non-host plants-effects on plant growth and Ni uptake / Y. Ma, M. Rajkumar, Y. Luo, et al. // *Journal of Hazardous Materials*. 2011. Vol. 195. P. 230–237. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.08.034
  12. Шабает В.П. Микробиологическая азотфиксация и рост растений при внесении ризосферных микроорганизмов и минеральных удобрений // *Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв*. М.: Наука, 2006. С. 195–211.
  13. Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Л.А. Воробьевой. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
  14. Ладонин Д.В. Формы соединений тяжелых металлов в техногенно-загрязненных почвах. М.: Издательство Московского университета, 2019. 312 с.
  15. Ладонин Д.В., Карпунин М.М. Фракционный состав соединений никеля, меди, цинка и свинца, загрязненных оксидами и растворимыми солями металлов // *Почвоведение*. 2011. № 8. С. 953–965.
  16. Chemical fractions and bioavailability of nickel in alluvial soils / M. Barman, S.P. Datta, R.K. Rattan, et al. // *Plant, Soil and Environment*. 2015. Vol. 61. No. 1. P. 17–22. doi: 10.17221/613/2014-PSE.
  17. Zawadzka A.M., Paszczyński A.J., Crawford R.L. Transformations of toxic metals and metalloids by *Pseudomonas stutzeri* strain KC and its siderophore pyridine-2,6-bis (thiocarboxylic acid) // *Advances in Applied Bioremediation (Soil Biology 17)* / Eds. Singh A., Kuhad R.C., Ward O.P. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. P. 221–238. doi: 10.1007/978-3-540-89621-0\_12.
  18. Mishra J., Singh R., Arora N. K. Alleviation of heavy metal stress in plants and remediation of soil by rhizosphere microorganisms // *Frontiers in Microbiology*. 2017. Vol. 8. URL: <http://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2017.01706/full>. (дата обращения: 15.11.2022). doi: 10.3389/fmicb.2017.01706.
  19. Phytoremediation of heavy metals assisted by plant growth promoting (PGP) bacteria: A review / A. Ullah, S. Heng, M.F.H. Munis, et al. // *Environmental and Experimental Botany*. 2015. Vol. 117. P. 28–40. doi: 10.1016/j.envexpbot.2015.05.001.
  20. Jakubus M., Graczyk M. Availability of nickel in soil evaluated by various chemical extractants and plant accumulation // *Agronomy*. 2020. Vol. 10. No. 11. 1805. URL: <http://www.mdpi.com/2073-4395/10/11/1805>. (дата обращения: 20.02.2023). doi: 10.3390/agronomy10111805.

Поступила в редакцию 03.10.2022

После доработки 23.02.2023

Принята к публикации 09.03.2023

## Правила для авторов

1. Редакция помещает не более двух статей одного автора в год. Это правило не распространяется на академиков и членов-корреспондентов РАН и других академий.

2. Объем статьи не менее **12 стр.**, включая таблицы (не более 4), рисунки (не более 4), библиографию (до 25 названий). Статья, набранная **крупным шрифтом через 1,5 интервала, пересылается по E-mail: nsm2308@yandex.ru.** В ней должны быть указаны **УДК, название статьи, инициалы и фамилии авторов, степени, полное название учреждения с адресом, E-mail, реферат** объемом 200-250 слов с указанием цели опытов, объекта исследований, анализа полученных данных), **ключевые слова и все продублировано на английском языке. Таблицы и рисунки в одном файле с текстом. В тексте выделить «Методика» и «Результаты и обсуждение».** Повторение одних и тех же данных в тексте, таблицах, графиках недопустимо. В конце статьи указать номер телефона (служебный, домашний, мобильный) каждого соавтора.

3. Рисунки (графический материал) должны быть выполнены **четко, представлены на отдельном листе в формате, обеспечивающем ясность передачи всех деталей, и/или на электронном носителе** (программы «Adobe PhotoShop», «Adobe Illustrator»).

4. **Статья с большим количеством формул (не более 10) представляется на электронном носителе** – (программа «MS Equation» или подобная).

5. При описании методики исследования следует ограничиваться оригинальной ее частью, при элементном анализе приводить только усредненные данные.

6. Используемая литература приводится в порядке очередности упоминания, в тексте – цифровые ссылки в квадратных скобках. Список литературы оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. Доля ссылок на источники старше 10 лет не должна превышать 30 % списка литературы, доля ссылок на публикации в журналах из ядра РИНЦ за последние 8 лет должна составлять не менее 50 % списка литературы. Желательны ссылки на журналы, входящие в базу данных Scopus и Web of Science. **Цитируемость своих работы не более 15%.**

7. При получении статьи редакция рассматривает ее соответствие тематике журнала и посылает на рецензию ведущим специалистам. Возвращение рукописи автору на доработку с копией рецензии не означает, что статья принята к печати. Датой поступления считается день получения редакцией окончательного варианта статьи.

8. Редакция посылает авторам на визу подготовленный к печати экземпляр статьи, который должен быть выслан обратно в течение суток с момента его получения.

**Авторам высылается журнал в электронном виде.**

**С аспирантов плата за публикацию не взимается.**

**Для получения гонорара за публикацию в англоязычном издании авторы могут обратиться в Российское авторское общество по адресу: 123995, Москва, Б. Бронная, д. 6, стр. 1, тел.: +7 (495) 697-3335; и на сайте РАО: [www.rao.ru](http://www.rao.ru) (подвести курсор на «Правообладатели», далее на «Авторам научных статей»). Здесь находятся документы для получения авторского гонорара.**

**Журнал рассылается только по подписке, в розничную продажу не поступает.**